

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа новых производственных технологий
Направление подготовки: 11.04.04 «Электроника и микроэлектроника»
Уровень образования: магистр
Отделение материаловедения
Период выполнения: 2018/2019 учебный год

МАГИСТЕРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Исследование фотоэлектрических свойств АФН-пленок для разработки автономного приемника оптического излучения

УДК 621.316.933-047.84

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ71	Одилжонов Обиджон Одилжонович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор	Рахимов Нейматжон Рахимович	доктор технических наук, профессор		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент ОСГН	Жаворнок Анастасия Валерьевна	-		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
старший преподаватель	Романова Светлана Владимировна	-		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор	Яковлев В.Ю.	доктор физико-математических наук, профессор		

Томск – 2019 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения
Универсальные компетенции	
P1	Способность <i>совершенствовать</i> и развивать свой <i>интеллектуальный и общекультурный уровень</i> , добиваться <i>нравственного и физического совершенствования</i> своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.
P2	Способность <i>использовать иностранный язык в профессиональной сфере</i> .
P3	Способность применять на практике <i>навыки и умения в организации</i> научно-исследовательских и производственных работ, в <i>управлении</i> коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности
P4	Способность использовать методологические основы <i>научного познания и творчества</i> , научную информацию в развитии отрасли, навыки проведения работ с использованием <i>современных информационных технологий</i> ; синтезировать и критически резюмировать информацию.
Профессиональные компетенции	
P5	Способность применять <i>углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания</i> в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.
P6	Способность <i>ставить и решать инновационные задачи</i> инженерного анализа в области электроэнергетики и электротехники с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности
P7	Способность выполнять <i>инженерные проекты</i> с применением оригинальных методов проектирования для достижения новых результатов, обеспечивающих конкурентные преимущества электроэнергетического и электротехнического производства в условиях жестких экономических и экологических ограничений.
P8	Способность выполнять инновационные <i>инженерные исследования</i> в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.
P9	Способность проводить <i>технико-экономическое обоснование</i> проектных решений; выполнять организационно-плановые расчеты по созданию или реорганизации производственных участков, планировать работу персонала и фондов оплаты труда; определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса.
P10	Способность проводить <i>монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные</i> работы электроэнергетического и электротехнического оборудования.
P11	Способность осваивать <i>новое</i> электроэнергетическое и электротехническое <i>оборудование</i> ; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.
P12	Способность разрабатывать <i>рабочую проектную и научно-техническую документацию</i> в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами; организовывать метрологическое обеспечение электроэнергетического и электротехнического оборудования; <i>составлять оперативную документацию</i> , предусмотренную правилами технической эксплуатации оборудования и организации работы

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа новых производственных технологий
Направление подготовки: 11.04.04 «Электроника и микроэлектроника»
Уровень образования: магистр
Отделение материаловедения
Период выполнения: 2018/2019 учебный год

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП _____ Яковлев В.Ю.
(Подпись) (Дата)

**ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
4НМ71	Одилжонов Обиджон Одилжонович

Тема работы:

Исследование фотоэлектрических свойств АФН-пленок для разработки автономного приемника оптического излучения

Утверждена приказом директора

От 02.04.2018 г. №2279/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	<i>Объект исследования – АФН-эффект, получение автономного приемника оптического излучения на основе АФН-пленок.</i>
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<i>1. Обзор литературы по теме диссертации; 2. Методика технологии получения эффективных АФН-пленок на основе CdTe, CdTe:Ag; 3. Методика увеличения АФН в пленочных структурах типа CdTe, получение отражающих серебряных покрытий ионной бомбардировкой; 4. Изготовление АФН – приемник и исследование кинетики АФН-эффекта в пленках типа CdTe;</i>

	5. <i>Перспективы создания оптоэлектронных приборов для контроля параметров веществ и материалов на основе АФН-приемника</i>
Перечень графического материала	Презентация, выполненная в MS PowerPoint
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Социальная ответственность	Романова Светлана Владимировна
Финансовый менеджмент	Жаворонок Анастасия Валерьевна
Раздел на английском языке	Аксёнова Наталия Валерьевна
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Обзор литературы	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор	Рахимов Неъматжон Рахимович	доктор технических наук, профессор		11.03.2019

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ71	Одилжонов Обиджон Одилжонович		11.03.2019

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
4НМ71	Одилжонов Обиджон Одилжонович

Школа	ИШНПТ	Отделение	Отделение материаловедения
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	11.04.04 Электроника и наноэлектроника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах; анкетирование; опрос.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Проведение предпроектного анализа. Определение целевого рынка и проведение его сегментирования. Выполнение SWOT-анализа проекта
2. Определение возможных альтернатив проведения научных исследований	Определение целей и ожиданий, требований проекта. Определение заинтересованных сторон и их ожиданий.
3. Планирование процесса управления НИИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	Составление календарного плана проекта. Определение бюджета НИИ
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Проведение оценки экономической эффективности определения отношений между пользователями социальной сети Twitter на основе анализа текста сообщений.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. Матрица SWOT
3. График проведения и бюджет НИИ
4. Расчёт денежного потока
5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Жаворонок Анастасия Валерьевна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ71	Одилжонов Обиджон одилжонович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
4НМ71	Одилжонов Обиджон Одилжонович

Школа	ИШНПТ	Отделение (НОЦ)	материаловедения
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Электроника и наноэлектроника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения

Объект: АФН-пленок
Область исследования физические процессы происходящие в разработки автономного пои.
Область применения оптоэлектронные и волоконно оптические датчики.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:

- специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;
- организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.

-Нормы трудового законодательства для работы в лаборатории:

- 1). НПБ 105-03
- 2). ТК РФ Статья 21. Основные права и обязанности работника.

-Организационные мероприятия при компоновки рабочей зоны:

- 1). Федеральный закона от 28.12.2013 N 421-ФЗ (условия труда и требования охраны труда на рабочем месте)

2. Производственная безопасность:

- Анализ выявленных вредных и опасных факторов
- Обоснование мероприятий по снижению воздействия

- 1)Отклонение показателей микроклимата в помещении
- 3)Повышенный уровень шума и вибрации
- 4)Недостаток освещённости рабочей зоны
- 5) Повышенный уровень электромагнитных излучений
- 6) Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека

3. Экологическая безопасность:

- Продукты распада плазмы выдуваемые азотом из вакуумной камеры в атмосферу
- Масло которое попадает из масляного насоса в камеру при откачки воздуха

4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:

- Возникновение пожара
- Наиболее распространенный вид ЧС

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Романова Светлана Владимировна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ71	Одилжонов Обиджон Одилжонович		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит: 133 ст., 22 рис., 25 табл., 24 источников.

Ключевые слова: АФН-эффект, АФН-пленка, Приемник оптического излучения (ПОИ), Полупроводниковые элементы CdTe, CdTe:Ag, оптрон открытого канала.

Объектом исследования являются АФН-пленки на основе CdTe, CdTe:Ag.

Цель работы – исследование фотоэлектрических свойств АФН-пленок на основе CdTe:Ag, разработка автономного ПОИ и создание оптоэлектронного преобразователя для контроля оптических параметров жидких сред.

В процессе работы проводились:

- Анализ существующих методов получения АФН-пленок и механизмов возникновения АФН-эффекта в пленочных полупроводниковых соединениях: CdTe, CdTe:Ag;
- Выбор оптимального технологического режима изготовления эффективных АФН-пленок из соединений CdTe, CdTe:Ag и выяснение механизма возникновения АФН-эффекта;
- Исследование фотоэлектрических свойств АФН-пленок CdTe:Ag;
- Разработка методики увеличения значения АФН в пленочных структурах;
- Изготовление автономного ПОИ на основе АФН-пленок;
- Создания оптоэлектронных устройств для контроля оптических параметров жидкостей на основе АФН-приемника.
- Обоснование перспективы создания оптоэлектронных приборов для контроля технологических параметров веществ и материалов на основе АФН-приемника.

Степень внедрения: частичная.

Область применения: Оптоэлектронные и волоконно оптические датчики.

Оглавление

Введение.....	13
1 Обзор литературы	15
1.1 Фотовольтаический эффект в полупроводниках.....	15
1.2 АФН-эффект в полупроводниковых пленках	16
1.3 О природе возникновения аномального фотонапряжения	23
1.4 Микроскопический механизм АФ эффекта	27
1.4.1 Асимметрия примесных центров	27
1.4.2 Асимметрия рассеяния на примесях и фононах.....	30
1.5 Постановка задачи	35
2 Экспериментальная часть.....	37
2.1 Методика изготовления эффективных АФН-пленок.....	37
2.1.1 Технология изготовления пленок CdTe:Ag.....	39
2.1.2 Методика увеличения АФН в пленочных структурах типа CdTe	41
2.2 Получение отражающих серебрянных покрытий ионной бомбардировкой	49
2.2.1 Экспериментальные камеры и измерительная аппаратура	50
2.2.2 Экспериментальные методики	53
3 Результаты исследования	57
3.1 Кинетика АФН-эффекта в пленках типа CdTe	57
3.2 Поглощение излучения в пленках CdTe:Ag.....	63
3.3 Изготовление АФН-приемника	66
3.4 Многоволновые устройства контроля оптических параметров веществ на основе СИД и АФН-приемников.....	69
3.5 Перспективы создания оптоэлектронных приборов для контроля параметров веществ и материалов на основе АФН-приемника.....	73
3.6 Выводы по разделу	76
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	78
4.1 Предпроектный анализ.....	78
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	78

4.1.2 SWOT-анализ.....	81
4.1.3 Оценка готовности проекта к коммерциализации.....	82
4.2 Инициация проекта	83
4.2.1 Цели и результаты проекта	83
4.2.2 Ограничения и допущения проекта	84
4.3 Планирование управления научно-техническим проектом	84
4.3.1 Иерархическая структура работ проекта.....	84
4.3.2 План проекта.....	85
4.3.3 Бюджет научного исследования	86
4.4 Организационная структура проекта	90
4.4.1 План управления коммуникациями проекта.....	91
4.4.2 Реестр рисков проекта	91
4.5 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	93
4.5.1 Оценка абсолютной эффективности исследования.....	93
4.5.2 Чистая текущая стоимость (NPV)	93
4.5.3 Оценка сравнительной эффективности исследования.....	97
5 Социальная ответственность	101
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	101
5.2 Производственная безопасность	103
5.2.1 Анализ вредных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению	103
5.2.2 Отклонение показателей микроклимата.....	103
5.2.3 Превышение уровня шума и вибрации.....	104
5.2.4 Недостаток освещенности рабочей зоны	106
5.2.5 Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека.....	107
5.3 Экологическая безопасность.....	108
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	108
5.4.1 Пожаровзрывоопасность	108

5.4.2 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследования и которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований	109
Заключение	110
Список использованных источников	113
Приложение А	117

СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АФ – аномально фотовольтаический эффект

АФН – аномально высокое фотонапряжение

АЦП – аналого-цифровой преобразователь

БОФС – блок обработки фотоэлектрического сигнала

ВАХ – вольт-амперная характеристика

ВОД – волоконно-оптический датчик

ВОЛС – волоконно-оптическая линия связи

ВС – волоконный световод

ЛД – лазерный диод

МНПВО – многократное НПВО

НПВО – нарушение полного внутреннего отражения

ОВ – оптическое волокно

ОК – оптический кабель

ОК – оптический канал

ООК – оптрон открытого канала

ОПП – оптоэлектронный первичный преобразователь

ОЭ – оптоэлектронные элементы

ПЗС – приборы с зарядовой связью

ПОИ – приемник оптического излучения

СИД – светоизлучающий диод

ФД – фотодиод

ФР – фоторезистор

ФТ – фототиристор

ФТТ – фототранзистор

ЧЭ – чувствительный элемент

ЭДС – электродвижущая сила

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

c – скорость света в вакууме

C – электрическая емкость; теплопроводность

E – энергия

E_g – ширина запрещенной зоны полупроводника

E_{Fn} и E_{Fp} – энергии уровня Ферми в n - и p -областях

n_n и p_p – соответственно концентрации электронов в n -области и дырок в p -области

J – интенсивность падающего света

R_0 – темновое сопротивление

Φ – поток оптического излучения

d_0 – диаметр оболочки оптического волокна

d_c – диаметр сердцевины оптического волокна

γ – длина волны излучения

L – длина диффузии

τ – время жизни

D – коэффициент диффузии

g – скорость генерации неравновесных носителей заряда

N – число микрофотоэлементов

α – угол освещения пленки

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время вопросы исследования фотоэлектрических свойств полупроводниковых пленок привлекают все больше внимания специалистов. Пленки, обладающие АФН-эффектами, представляют теоретический и практический интерес при создании первичных преобразователей – приемников оптического излучения (ПОИ).

Существующие ПОИ и устройства на их основе требуют обязательного применения источников питания. В них выходное напряжение, создаваемое р-п-переходом в вентильном режиме заведомо ограничено шириной запрещенной зоны полупроводника. Одним из перспективных оптических методов является оптоэлектронный контроль, на основе излучателя и АФН-приемника, который позволяет исключить внешний источник питания для ПОИ, снизить вес и габариты, обеспечивает полную электрическую развязку между цепями светоизлучающий диод ПОИ.

Целью настоящей работы является исследование фотоэлектрических свойств АФН-пленок на основе CdTe, CdTe:Ag, разработка автономного ПОИ и создание оптоэлектронного преобразователя для контроля оптических параметров жидких сред. В связи с чем в работе решаются следующие задачи:

- Анализ существующих методов получения АФН-пленок и механизмов возникновения АФН-эффекта в пленочных полупроводниковых соединений: CdTe, CdTe:Ag;
- Выбор оптимального технологического режима изготовления эффективных АФН-пленок из соединений CdTe, CdTe:Ag и выяснение механизма возникновения АФН-эффекта;
- Исследование фотоэлектрических свойств АФН-пленок CdTe:Ag;
- Разработка методики увеличения значения АФН в пленочных структурах;
- Изготовление автономного ПОИ на основе АФН-пленок;
- Создания оптоэлектронных устройств для контроля оптических

параметров жидкостей на основе АФН-приемника.

Практическая ценность работы заключается в том, что разработанные в данной магистерской работе методы изготовления АФН-приемников открывают новый шаг для развития оптоэлектронного приборостроения. Предложена классификация вариантов включения АФН-приемников в оптоэлектронных устройствах контроля. Получено аналитическое выражение распределения излучения светоизлучающего диода после взаимодействия с контролируемым объектом, позволяющее определить оптимальную площадь светочувствительной поверхности АФН-приемника.

1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Фотовольтаический эффект в полупроводниках

Известно, что фотоэдс (или фотонапряжение) в полупроводниках независимо от ее природы не может превышать ширину запрещенной зоны, т.е. несколько вольт [1]. Например, в однородном полупроводнике демберовское (диффузионное) фотонапряжение для сколь угодно большой интенсивности возбуждающего света не превышает значения:

$$V = \frac{kT}{q} \ln \frac{n_1}{n_0} \ll \frac{kT}{q} \ln \frac{N_c}{n_0} = E_q \quad (1.1)$$

здесь E_q - ширина запрещенной зоны полупроводника, n_1 и n_0 - соответственно неравновесная и равновесная концентрация носителей, N_c - плотность состояний.

Другим примером может служить фотонапряжение, возникающее при освещении р-п- перехода [2].

$$V \leq \frac{kT}{q} \ln \frac{n_n p_p}{n_0^2} = E_{Fn} - E_{Fp} \quad (1.2)$$

которое также не превышает E_q . Здесь n_n и p_p - соответственно концентрации электронов в п-области и дырок в р-области, E_{Fn} и E_{Fp} - энергии уровня Ферми в п- и р- областях.

До последнего времени исключение из этого правила составляли лишь полупроводниковые текстуры, в которых наблюдается эффект аномально больших фотонапряжений (АФН-эффект), обусловленный сложением элементарных фотоэдс Дембера (1.1) или элементарных фотоэдс (1.2), развивающихся на отдельных р-п-переходах текстуры [3]. В таких текстурах из

напыленных слоев CdTe, Si, Ge, GaAs, PbS и т.д. фотонапряжения могут достигать значений порядка нескольких сотен вольт на сантиметр длины в направлении сложения элементарных фотоэдс.

Сперва эффект аномально больших фотонапряжений наблюдался в ряде однородных монокристаллов сегнетоэлектриков [4-12]. Оказалось, что при равномерном освещении однородного сегнетоэлектрика с разомкнутыми электродами в собственной или примесной области спектра возникает напряжение порядка 10^3 - 10^8 превышающее, таким образом, величину E_q на два-четыре порядка.

К настоящему времени опубликовано несколько десятков экспериментальных работ по АФ-эффекту. Прежде всего следует сказать, что факт существования АФ-эффекта сейчас можно считать твердо установленным для многих типов полупроводниковых кристаллов.

1.2 АФН-эффект в полупроводниковых пленках

В 1946 г. Старкевич, Сосновский и Симпсон [13] наблюдали фотонапряжения $E_q=1,2$ В сульфиде свинца, у которого $E_q=0,4$ В, причем авторы не только отметили этот факт как некоторую физическую аномалию, но и высказали для его объяснения некоторые идеи.

Изучением обнаруженного АФН-эффекта занимались на первом этапе Р.Я.Берлага с сотр. [14], Швабе [15] и Пивковский [16] и др. По получению и исследованию АФН-эффекта имеется много работ, мы же здесь ограничиваемся ссылкой на библиографию, приведенную в работах [17-21].

Интерес к физическим и прикладным аспектам АФН-эффекта существенно увеличился после того, как Пенсак и Голдстейн [22] показали, что фотонапряжение в пленках CdTe при комнатной температуре может достигать сотен вольт. Они выявили, что величина АФН зависит от толщины слоя и температуры подложки в процессе напыления пленки и для наличия большей подвижности при формировании АФН-эффекта в пленках теллурида кадмия

важна температура подложки. Пенсак и Голдстейн показали, что оптимальная область температуры подложки лежит в пределах 150-200⁰С, при температурах подложки 250⁰С АФН-эффект отсутствовал.

В результате анализа технологического процесса напыления ряд исследователи показали, что для получения эффективных пленок необходимо сочетание оптимальных значений, давления и состава остаточных газов в вакуумной камере, температуры подложки и испарителя пленки и угла напыления.

Любин В.М. и Федоров Г.А. [23] получили более эффективные АФН-пленки из теллурида кадмия при ~300⁰С. В работах [24,25] АФН-пленка CdTe получена двумя способами. В первом случае необходимый материал испарялся из одного тигля. Пленки второй группы получались одновременным испарением из двух тиглей CdTe и Cd. Температура подложки была 270⁰С. Подобные исследования в технологическом и практическом аспекте проведены авторами работы [18,26]. Показано, что при температуре ниже 100⁰С не возникает аномального высокого фотонапряжения.

В настоящее время разносторонне изучены фотоэлектрические свойства АФН-пленки. В работах [17,18,22] измерялись вольтамперные характеристики (ВАХ) в широком диапазоне освещенности света. На рис.1.1 приведены типичные темновые и световые вольтамперные характеристики АФН-пленок CdTe, полученные при комнатной температуре [18]. Вольтамперные характеристики всех исследованных АФН-пленок в интервале значений освещенностей 0...3,5·10⁴ лк и напряженностей электрического поля 0...10³ В/см подчиняются закону Ома.

Теоретическое рассмотрение вольтамперной характеристики батареи, состоящей из большого числа р-п-переходов, впервые проведено В.И.Стафеевым [27].

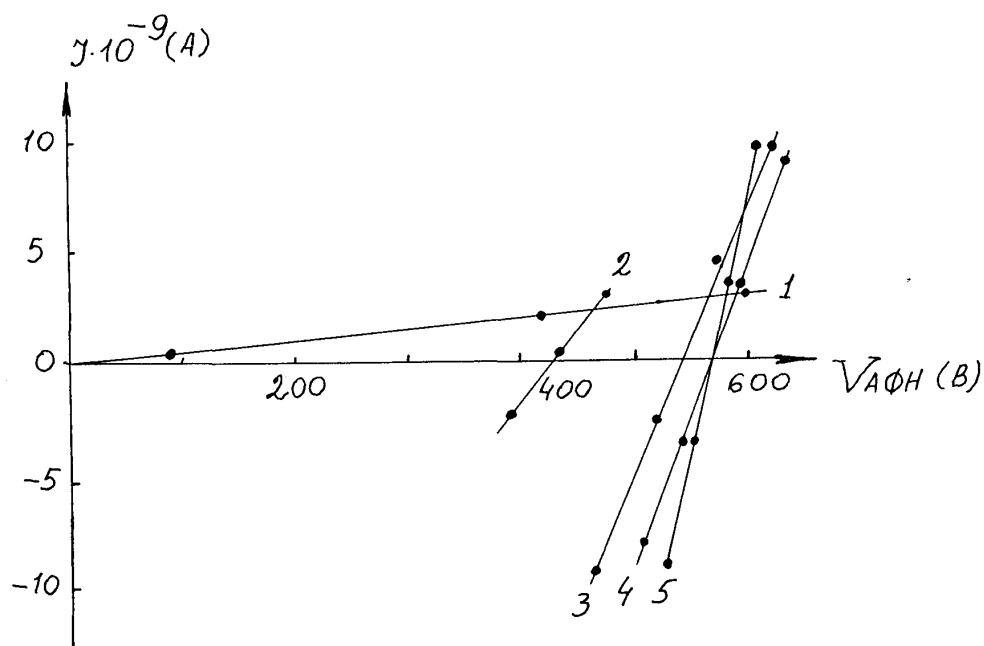


Рисунок 1.1 – Вольт-амперная характеристика АФН-пленок (CdTe) теллурида кадмия при разных освещенностях:

1 – $B = 0$; 2 – $B = 1,75 \cdot 10^4$ Лк; 3 – $B = 7,7 \cdot 10^4$ Лк;

4 – $B = 1,36 \cdot 10^4$ Лк; 5 – $B = 2,5 \cdot 10^4$ Лк.

В работе [21] показано, что темновые ВАХ для пленок линейны до значения $E = 5 \cdot 10^3$ В/см, сверхлинейны в интервале $5 \cdot 10^3 \dots 5 \cdot 10^4$ В/см. Ни на одной пленке сублинейный участок не был обнаружен вплоть до пробойных значений $E \geq 10^5$ В/см. При освещении образцов их ВАХ спрямляются и, начиная с некоторых значений интенсивности света, становятся линейными.

Исследования на основе спектральных зависимостей показали, что фотонапряжения вызываются светом из области собственного поглощения (рис.1.2).

Принимая во внимание тот факт, что АФН-пленки получены анизотропным напылением, естественно было ожидать появления этой анизотропии при освещении пленок поляризованным светом [3].

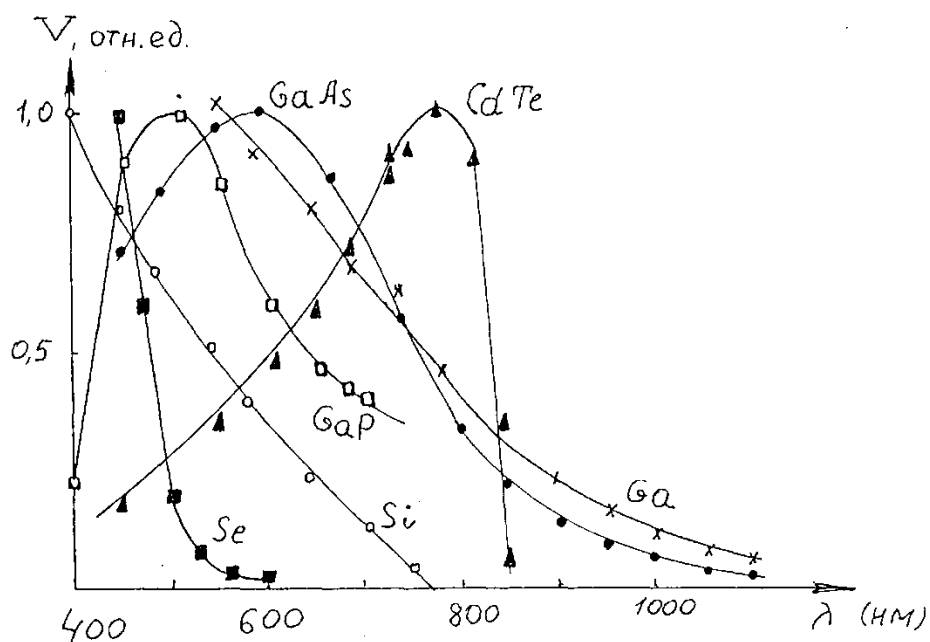


Рисунок 1.2 – Типичные спектры фотонапряжения АФН-пленок

Представлялось возможным выяснение влияния поляризованного света на величину $V_{\text{АФН}}$. Эксперименты в поляризованном свете показали, что у АФН-пленок кремния и арсенида галлия фотонапряжение сильно зависит от ориентации плоскости поляризации света относительно прямой, соединяющей электроды пленки.

Типичные полярные диаграммы зависимости $V_{\text{АФН}}$ от угла β даны на рис.1.3. Для пленок Si и GaAs максимум $V_{\text{АФН}}$ расположен либо при $\beta=0$, либо при $\beta=90^\circ$. Например, для Si-пленки приведенной на рис.1.3 и GaAs-пленки максимум соответствует $\beta=90^\circ$.

Для пленок Si и GaAs изменение величины $V_{\text{АФН}}$ от β_{max} до β_{min} составляет, соответственно, 50% и 30%. Разница между максимальным и минимальным значениями фотонапряжения падает с уменьшением толщины пленок. Эти данные указали на то, что анизотропия пленок накапливается с ростом толщины. С этим, по-видимому, в какой-то мере связано отсутствие влияния угла на величину $V_{\text{АФН}}$ в АФН-пленках Ge и халькогенидных соединений.

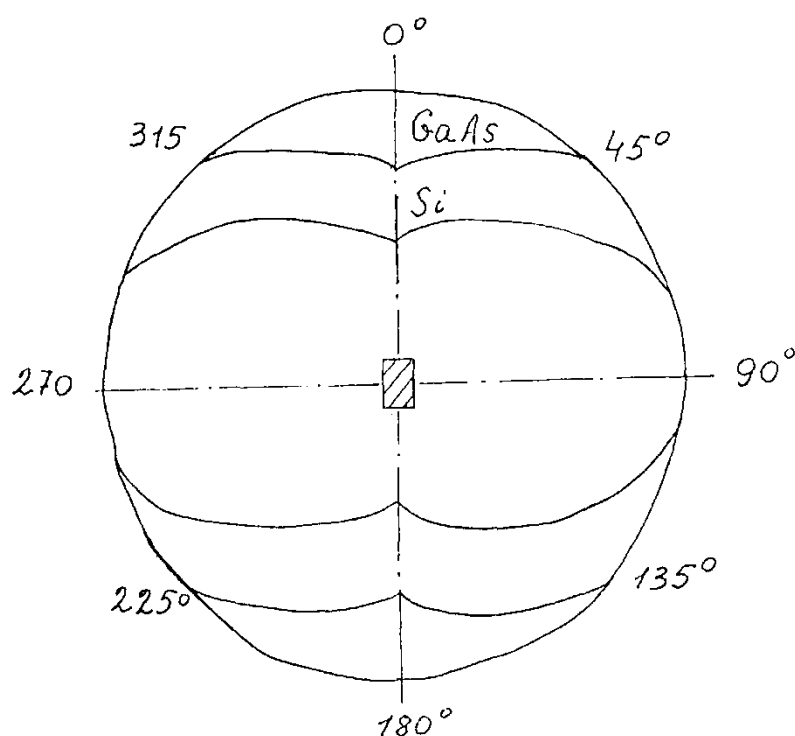


Рисунок 1.3 – Зависимость фотонапряжения от угла между плоскостью электрического вектора возбуждающего света и прямой, соединяющей электроды пленки

Влияние ориентации плоскости поляризации света на величину пленок $V_{\text{АФН}}$ и CdTe и Se велико, оно составляет 5-10% для CdTe и 10-20% для Se [3].

Для получения информации о величине фотонапряжения, тока короткого замыкания и сопротивления пленок во всем интервале промежуточных температур в работах [18,22] проведены температурные исследования. В этих работах, отмечается, что с понижением температуры фотонапряжение и сопротивление возрастают.

На рис.1.4. приведены экспериментальные результаты [21] для пленок CdTe [3], а также температурные зависимости параметров АФН-пленок из работ [22]. Как видно из рис.1.4, ток короткого замыкания в пленках CdTe практически не зависит от температуры. Температурный ход генерируемого фотонапряжения идентичен температурной зависимости сопротивления пленки. В работе [3] приведен метод изготовления АФН-пленки CdTe путем термического испарения.

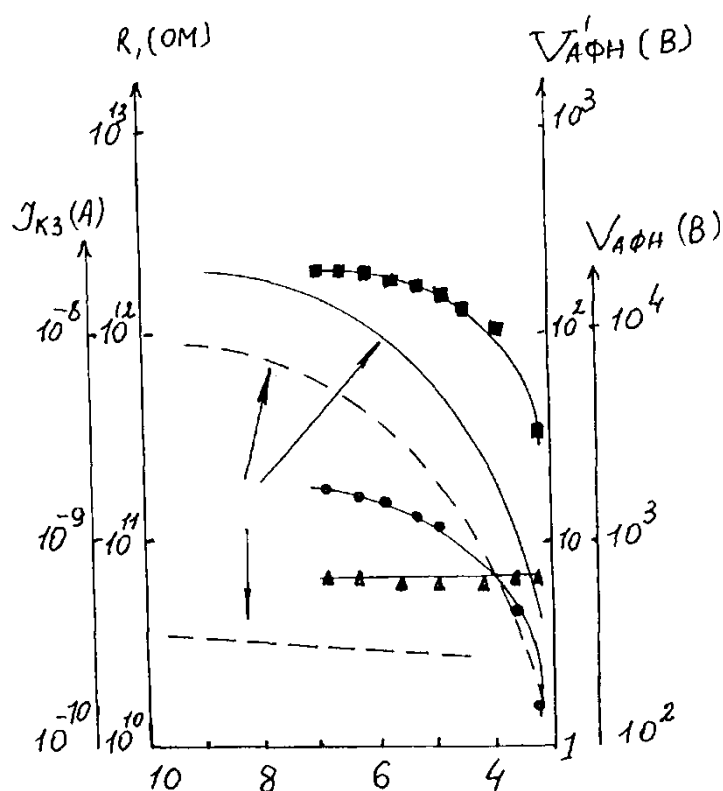


Рисунок 1.4 – Температурные зависимости АФН-пленок CdTe [3]

Испарение порошкообразного материала (в некоторых случаях использовался кристаллический CdTe) теллурида кадмия производились из тигля, покрытого окисью алюминия при температуре $\sim 750^{\circ}\text{C}$. Давление остаточных газов в процессе напыления пленок CdTe было $10^{-4} \dots 10^{-5}$ мм.рт.ст., угол напыления находился в пределах 45° . Подложками служили стекло, сегнетоэлектрик (НБС) слюда, кварц, LiF, NaCl и т.д. Толщина слоя находилась в пределах ~ 1 мкм. Некоторые параметры АФН пленок теллурида кадмия приведены в табл.1.1. Нужно отметить, что авторам работ [2] удалось получить фотонапряжения в пленках теллурида кадмия при комнатной температуре.

Высоковольтное напряжение отмечено при осаждении теллурида кадмия в пределах температур $250 \dots 400^{\circ}\text{C}$ и углах молекулярного пучка $10 \dots 60^{\circ}$. Верхний предел ограничивался реиспарением материала с подложки.

Для выяснения характера поведения пленок при термообработке мы исследовали температурные зависимости генерируемого фотонапряжения

$V_{\text{АФН}}$, тока короткого замыкания $J_{\text{КЗ}}$ и сопротивления R пленок теллурида кадмия [2].

Было изготовлено несколько десятков образцов пленок толщиной 0,7-1,5 мк. Исходный материал - кристаллический. Испарение производили в вакууме 10^{-4} тор на стеклянной подложке $(1,5 \times 1) \text{ см}^2$, температура которой равна 100-300 $^{\circ}\text{C}$.

Таблица 1.1 – параметры АФН пленок теллурида кадмия

Материал	При температурах, $T, ^{\circ}\text{C}$									
	комн.	50	100	150	200	225	250	300	350	400
	Вольт									
Стекло	20	50	140	220	260	300	180	120	50	25
Слюда	10	70	220	240	280	340	160	140	70	40
Кварц	15	60	120	200	130	100	80	40	30	20
Сегнето- электрик НБС	10	60	120	120	135	140	120	70	40	35

Пленки обрабатывали на воздухе в течение 10-30 мин. в муфельной печи. Температуру образцов измеряли с помощью медьконстантановой термопары.

Фотонапряжение пленки сначала возрастало (Рис.1.5, кривая 1) после чего монотонно падало. В процессе термообработки полярность пленок оставалась неизменной, освещение при всех измерениях было постоянным ($I=25000$ лк). Ток короткого замыкания с увеличением температуры до 200 $^{\circ}\text{C}$ снижался (Рис.1.5, кривая 3), сопротивление пленок при 50-100 $^{\circ}\text{C}$ повышалось (Рис.1.5, кривая 2).

В работе [3] показано, что зависимость $J_{\text{КЗ}}$, $V_{\text{АФН}}$ и R для пленок CdTe в области температур 20-180 $^{\circ}\text{C}$ имеет сложный характер, например, в одних образцах фотонапряжение уменьшалось, в других - увеличивалось.

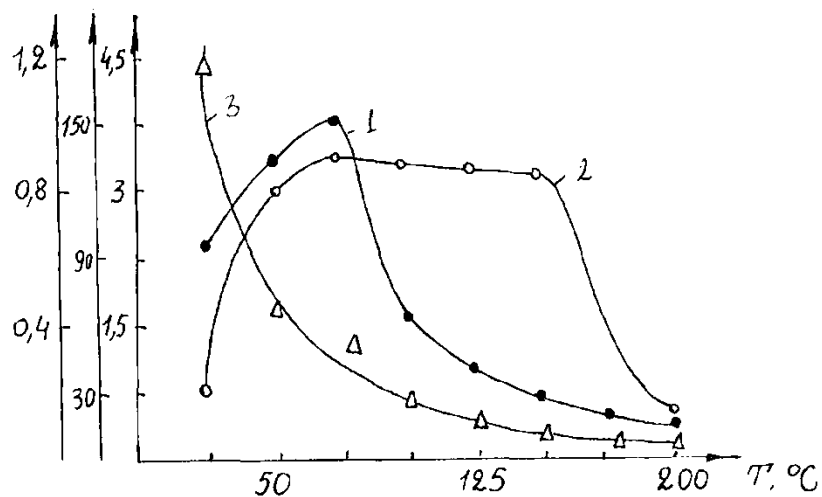


Рисунок 1.5 – Зависимость ВАФН (1), R (2) и Jкз (3) от T.

Изменение параметров АФН-пленок теллурида кадмия от температуры, по-видимому, обусловлено их окислением, т.е. при термообработке появились прослойки и при определенной температуре происходило насыщение. В результате сопротивление и фотонапряжение образцов монотонно уменьшалось. Кроме того, могли меняться структура и размер микрокристаллов [30,31].

1.3 О природе возникновения аномального фотонапряжения

Природа аномального фотонапряжения, превышающего ширину запрещенной зоны полупроводника, рассматривается во всех работах об АФН-эффекте.

Теоретически рассматривая вопрос о причинах возникновения аномально больших фотонапряжений, авторы работы [3] доказали теорему о необходимости батарейной структуры АФН-плёнок. После этого вопрос о природе элементарных процессов, приводящих к возникновению АФН эффекта, был сведен к дилемме - либо фотовольтаический эффект в микро p-n - переходах, либо диффузионной демберовский эффект в микрообластях, однородных по типу проводимости. На рис.1.6 схематически изображена структура АФН-пленки, соответствующая p-n- переходной (а) и демберовский

(б) моделям. В первой из этих моделей $V_{АФН}$ возникает в результате суммирования разности фотонапряжений, генерируемых на переходах.

Фотонапряжение для р-п - перехода описывается формулой

$$V_{p-n} = \frac{kT}{q} \ln \left(1 + \frac{\Gamma_{\Phi}}{\Gamma_s} \right) \quad (1.3)$$

В демберовской модели (рис.1.6, б) активная часть пленки состоит из фоточувствительных областей, которые разделены нефотоактивными прослойками, препятствующими обмену свободными носителями между этими фотопроводящими областями.

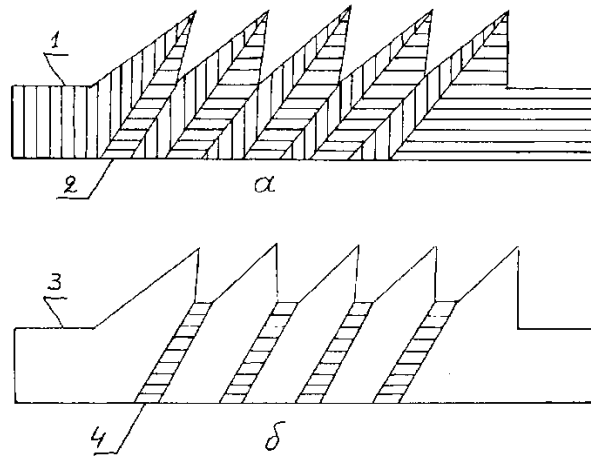


Рисунок 1.6 – Модель АФН-пленки из микро р-п -переходов (а) и из фотодиффузионных микрообластей (б)
1,2 – р-п области; 3 – фотоактивная область; 4 – прослойка

Прослойки могут быть как высокоомными, так и низкоомными. Роль их состоит в том, что они препятствуют выравниванию концентрации носителей справа и слева от контакта в двух соседних демберовских микрофотоэлементах.

Фотонапряжение в демберовской модели выражается формулой

$$V_{Дембер} = \frac{\kappa T}{q} \frac{\nu - 1}{\nu + 1} \ln \frac{1 + \Delta\sigma_2/\sigma_0}{1 + \Delta\sigma_1/\sigma_0} \quad (1.4)$$

где σ_0 – темновая проводимость пленки, а $\Delta\sigma_1$ и $\Delta\sigma_2$ значения фотопроводимости на концах элемента.

Из-за однотипного характера формул (1.3) и (1.4) большинство экспериментальных фактов оказывается не критичным по отношению к механизму элементарных процессов, лежащих в основе АФН эффекта, т.е. по крайней мере качественно согласуется как с р-п - переходной, так и с демберовской моделью микрофотоэлементов. Замечая, что $J_{\phi} < 1$ и $\Delta\sigma < 1$, а $J_s < R_0$ и $\sigma_0 = 1/R_0$ (J - интенсивность падающего света, R_0 - темновое сопротивление) видно, что как при фотодиффузионном, так и при фотовольтаическом механизме

$$V = f(J_1 R_0), \quad (1.5)$$

т.е. АФН эффект может возникать только в высокоомных пленках. Иначе говоря, АФН пленка представляет собой генератор тока и, как источник высокого напряжения, может работать только на высокоомную нагрузку [3].

В [13,14] была предложена модель аномально фотовольтаического эффекта, основанная на батарее из микро - р-п- переходов. После, Швабе [15], исследовавший зависимость фотонапряжения от угла падения света, обнаружил инверсию знака $V_{\text{АФН}}$ при фронтальном освещении в пределах от 0 до 180° С.

Этот результат, полученный на пленках PbS, не мог быть объяснен в рамках р-п - переходной модели и вполне естественно, что Швабе предложил модель, основанную на батарее, в которой микрофотонапряжение возникает благодаря эффекту Дембера. Установлением таких зависимостей как $V_{\text{АФН}}$ от интенсивности света, температуры и т.д. нельзя было однозначно выявить тот или иной механизм АФН эффекта. Полученный результат не могли связывать с вкладом каждого микроэлемента, поэтому нужно было проводить такие эксперименты, которые для обоих механизмов приводили бы к диаметрально противоположным следствиям.

По мнению Адировича с сотр. [3,4], которые развивали идею Швабе, результаты исследования угловых диаграмм в белом и монохроматическом свете могут служить критерием для определения физической причины возникновения АФН эффекта.

Если АФН структура представляет собой батарею p-n - переходов, то очевидно, что при фронтальной освещенности в пределах 0-180°С инверсия знака $V_{\text{АФН}}$ должна отсутствовать.

Если АФН структура представляет собой батарею демберовских элементов, то, в белом свете при фронтальном освещении в пределах 0-180°С знак фотонапряжения должен изменяться, однако, как показано в работе [3], возможен, аномальный демберэффект. В этом случае знак демберэффекта не связан с направлением светового потока, а обусловлен различием скоростей поверхностей рекомбинации на различных гранях. Поэтому при аномальном демберэффекте, а также при фотовольтаическом эффекте на p-n - переходах $V_{\text{АФН}}$ не меняет знака при изменении угла падения света. В работе [4,5] показано, что эта неопределенность устраняется если производить угловые измерения $V_{\text{АФН}}(\beta)$ при освещении пленок монохроматическим светом с различными длинами волн.

Таким образом, в работах [34, 35] доказано, что наличие инверсии знака $V_{\text{АФН}}$ при изменении угла освещения в пределах 0-180°С однозначно свидетельствует о том, что АФН эффект обусловлен демберовский механизмом, а отсутствие инверсии не позволяет сделать однозначного вывода, ибо в этом случае может иметь место либо p-n-переходный механизм, либо аномальный демберэффект. Эту частичную неопределенность устранили путем перехода к исследованию $V_{\text{АФН}}(\beta)$ при освещении коротковолновым светом.

Аномальный демберэффект имеет место, когда скорость поверхностной рекомбинации на освещаемой грани достаточна велика, а на затемненной грани - мала. При длинноволновом возбуждении, т.е. при слабом поглощении света $\alpha * d < 1$ ($\alpha *$ - коэффициент поглощения, d - толщина пленки) градиенты концентраций неравновесных носителей заряда и поток биполярной диффузии направлены не по световому потоку, а напротив него, вследствие чего знак демберовского $V_{\text{АФН}}$ аномален, если, однако, от возбуждения длинноволновым светом перейти в область коротких волн, то вследствие увеличения коэффициента поглощения генерация электронно-дырочных пар будет

происходить только вблизи освещенной поверхности, направление потока биполярной диффузии станет независимым от скоростей поверхностной рекомбинации и вместо аномального демберэффекта, имеющего место на длинных волнах, возникает нормальный демберэффект. Следовательно, если АФН эффект обусловлен демберовским механизмом, то при возбуждении пленки достаточно коротковолновым светом возникает инверсия знака. Напротив, при р-п-переходном механизме $V_{\text{АФН}}(\beta)$ должна оставаться неинверсионной в условиях коротковолнового фронтального возбуждения.

Таким образом, комбинация угловых и спектральных измерений дает однозначный ответ на вопрос о природе микрофотоэлементов в АФН пленках [34,35].

Полученные данные позволяют считать, что в пленках Ge, Si, InAs, Al₂Se₃, GaAs, PbS природа АФН эффекта демберовская (фотодиффузионная), а в пленках CdSe, CdTe и халькогенидных сплавов р-п-переходная (фотовольтаическая).

1.4 Микроскопический механизм АФ эффекта

Выше уже указывалось, что природа АФ эффекта сегнетоэлектриков связана с механизмом фотовольтаического тока в них. Ниже мы остановимся на некоторых из моделей, главным образом в связи с изложенными выше данными экспериментов. Следует отметить, что некоторые модели не связаны с сегнетоэлектрической природой.

1.4.1 Асимметрия примесных центров

В [5,12] была предложена модель аномального фотовольтаического эффекта, основанная на электронных переходах в зону из примесного центра, имеющего асимметричное распределение потенциала. Это приводит к асимметричному выбросу электрона с уровня примеси в зону, и соответственно, стационарному фотовольтаическому току.

Следуя [12], рассмотрим потенциал центра в форме асимметричного прямоугольного барьера (рис.1.7). Возбуждение электрона между состояниями ξ_0 и ξ (для $E < V_2$) приводит к сдвигу локализованного электрона.

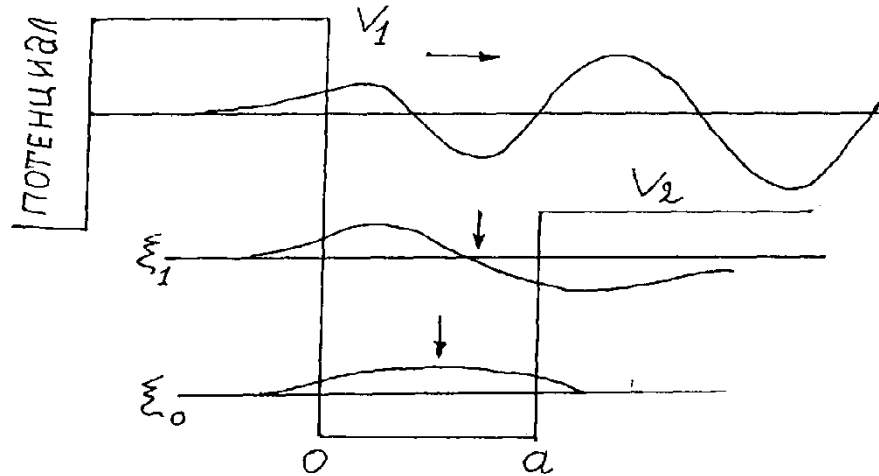


Рисунок 1.7 – Асимметричный потенциал примесного центра в сегнетоэлектрике и соответствующие ему энергии и волновые функции [12]

Это, в свою очередь, может привести к изменению спонтанной поляризации [7]. Если возбужденный электрон имеет энергию $V_2 < E < V_1$, он переходит в свободное состояние с волновым вектором $+\vec{k}$ (направление волнового вектора параллельно спонтанной поляризации). Электрон с волновым вектором $-\vec{k}$ только частично просачивается через потенциальный барьер. Таким образом, вероятность P_+ движения электрона в направлении $+\vec{k}$ отличается от вероятности P_- его движения в направлении $-\vec{k}$ тем больше, чем больше спонтанная поляризация.

Так как асимметрия потенциала примесного центра определяется направлениям спонтанной поляризации и одинакова для всех центров, то для интенсивности возбуждающего света I с частотой ω_0 плотность фотовольтаического тока J_1 , связанная с асимметричным выбросом электрона, равна

$$J_1 = \frac{q\alpha^* I}{\hbar\omega_0} (P_+ l_+ - P_- l_-) \quad (1.6)$$

где l_+ , l_- - свободный пробег электрона в направлении $\pm k$, α^* - коэффициент поглощения света.

Из тока (1.6) следует вычесть ток, связанный с рекомбинацией фотовозбужденных носителей. Действительно, после рассеяния фотовозбужденного носителя его направленный импульс $\vec{k}=0$, и он до рекомбинации не дает вклада в фотовольтаический ток. Обозначая вероятность рекомбинации в направлении $+\vec{k}$, $-\vec{k}$, соответственно через P_+^1 и P_-^1 получим из (1.6) соответствующий ток рекомбинации, заменив, P_+ и P_- на P_+^1 и P_-^1 и l_+ , l_- на l_+^1 и l_-^1 . Окончательно в [11] было получено следующее выражение для фотовольтаического тока:

$$J = J_1 - J_2 = K\alpha^* I \quad (1.7)$$

где константа Гласса

$$K = \frac{q}{\hbar\omega_0} \cdot (l_+ P_+ - l_- P_- - l_+^1 P_+^1 - l_-^1 P_-^1) \quad (1.8)$$

зависит только от природы примесного центра, свободного пробега электрона и энергии фотона.

По данным [12], вольтамперным характеристикам для $LiNbO_3$ отвечает $K=2,5 \cdot 10^{-9}$ А.см.Вт⁻¹ и $\sigma_{\text{д}} + \sigma_{\text{о}} = 1,3 \cdot 10^{-14} + 1,2 \cdot 10^{-12}$ Ом⁻¹см⁻¹. С этими значениями хорошо согласуется фотонапряжение, вычисленное для $LiNbO_3$ по (1.6). По этим же данным константа Гласса K для $LiNbO_3:Fe$ не зависит от концентрации донорных центров Fe^{2+} и Fe^{3+} и от соотношения между концентрациями Fe^{2+} и Fe^{3+} . В то же время это соотношение сильно влияет

на электропроводность и фотопроводимость кристалла, и, естественно, на АФН-эффект [58].

При восстановлении $LiNbO_3:Fe$ в атмосфере азота и увеличения концентрации Fe^{2+} за счет концентрации Fe^{3+} , значения σ_0 и σ_0 растут и, следовательно, значения V и $\overset{o}{A}$ падают.

Экспериментальными значениями K в сегнетоэлектрических ниобатах отвечает средний сдвиг электрона $\langle l \rangle \approx 1 \overset{o}{A}$ [12,41].

Следует оговорить, что в условиях столь малых сдвигов вопрос о применимости зонной модели и приближения эффективной массы остается открытым. Поэтому в модели Гласса величину $\langle l \rangle$ следует скорее связать со средним сдвигом в прыжковом механизме (полярон малого радиуса [99]). Здесь уместно сделать следующее замечание. При выводе (1.7), (1.8) предполагалось в неявной форме, что квантовый выход электронов $\gamma=1$. Руппель с сотр. [11] измерили выход электронов в зону проводимости из Fe^{2+} центров в $LiNbO_3$ и показали, что $\gamma \leq 4 \cdot 10^{-3}$. Согласно (1.7), (1.8) это приводит к среднему сдвигу $\langle l \rangle = 40 \overset{o}{A}$, что значительно больше средней длины прыжка и, следовательно, противоречит модели Гласса. Для объяснения природы фотовольтаического тока авторы [11,92] привлекают модель фотоиндуцированных флуктуаций, на которой мы остановимся.

1.4.2 Асимметрия рассеяния на примесях и фононах

Рассмотренный в модели Гласса [5,12] фотовольтаический ток является существенно примесным, так как возникает из-за асимметрии потенциала примесного центра.

В [70,89] было показано, что не только асимметрия примесных центров, ответственных за генерацию и рекомбинацию неравновесных носителей, но и асимметрия рассеяния на примесях и фононах приводит к фотовольтаическому

току в сегнетоэлектрике. В свою очередь, асимметрия элементарных электронных процессов в сегнетоэлектрике связана с асимметричной формой потенциала примесных центров и их одинаковой ориентацией в решетке по отношению к направлению спонтанной поляризации. Следуя [89,90] это можно показать следующим образом. Изменение концентрации и распределение неравновесных электронов в зоне проводимости описывается кинетическим уравнением для функции распределения $f_k^r \rightarrow (x)$;

$$\frac{\partial f_{\vec{k}}}{\partial t} = I_{\vec{k}}^u - I_{\vec{k}}^p + I_{\vec{k}}^n + I_{\vec{k}}^{\text{TM}} \quad (1.9)$$

где $I_{\vec{k}}^u$ и $I_{\vec{k}}^p$ - соответственно скорость возбуждения и рекомбинации электронов, а $I_{\vec{k}}^n$ и $I_{\vec{k}}^{\text{TM}}$ - число столкновений электрона за единицу времени с примесями и фононами. Если функция распределения симметрична и удовлетворяет условию $f_{\vec{k}}^s = f_{-\vec{k}}^s$, то тока в кристалле нет. Если в правой части кинетического уравнения (1.9) содержится асимметричный член, удовлетворяющий условию $I_{\vec{k}}^{as}(f_{\vec{k}}^s) = -I_{-\vec{k}}^{as}(f_{\vec{k}}^s)$, то стационарное решение уравнения также содержит асимметричный член, т.е. асимметричную часть функции распределения $f_k^{as} = -f_{-k}^{as}$.

Наличие асимметричной функции распределения приводит к стационарному току

$$J = \frac{q}{\hbar} \int \frac{\partial \varepsilon}{\partial \vec{k}} f_{\vec{k}} d\vec{k} = \frac{q}{\hbar} \int \frac{\partial \varepsilon}{\partial \vec{k}} f_{\vec{k}}^{as} d\vec{k} \quad (1.10)$$

В [89,90] было показано, что не только возбуждение и рекомбинация, но и рассеяние на дипольном центре с асимметричным потенциалом является асимметричным и, следовательно, приводит к появлению асимметричной части в функции распределения, т.е. к стационарному току. Существенно, что всюду шла речь о неравновесной функции распределения. В [89,90] было строго

показано, что для равновесных электронов $f_k^{as} = 0$, а следовательно, равновесный (темновой) ток равен нулю. Это соответствует тому, что в равновесном случае в (1.7) ток, связанный с возбуждением электронов из асимметричных центров, точно компенсируется током, обусловленным рекомбинацией электронов. Теория, развитая в [8,9] приводит, таким образом, как к примесному, так и к собственному фотовольтаическому току. Однако в последнем случае (переходы зона-зона) фотовольтаический ток оказывается пропорциональным квадрату времени релаксации $J \sim \tau_0^2$. Таким образом, согласно [89,90], фотовольтаический ток при собственном поглощении должен быть на несколько порядков ниже, чем для примесного эффекта, что, как указывалось выше, противоречит эксперименту.

В работе [9] рассматривались фототоки, обусловленные асимметрией процессов ионизации и рекомбинации электронов и дырок с примесных центров, а также асимметрией рассеяния на примесях. Однако в [89] отмечалось, что эффект возможен и в беспримесных кристаллах за счет электрон-фононного взаимодействия на оптические межзонные переходы, а также рассеянию электронов и дырок на фононах. Рассматриваются как акустические, так и оптические фононные моды.

В работе [9] рассмотрен АФ-эффект в полупроводниках и металлах в случае, когда частота света недостаточна для оптических переходов примесь-зона и зона-зона. Показано, что фототок возникает за счет асимметрии рассеяния электронов (дырок) в поле световой волны на примесях, фононах и электронах (дырок) и его величина пропорциональна коэффициенту поглощения света. Порядок величины фототока, нормированного на коэффициент поглощения света тот же, что и для межзонных оптических переходов.

Условия для наблюдения фототока в полупроводниках и металлах более жесткие, чем в диэлектриках, так как сопротивление измерительного прибора не должно заметно превосходить сопротивление кристалла.

Несмотря на то, что экспериментальные данные [3,5,9] и [8] указывают на наличие собственного фотовольтаического тока, равного по порядку величины примесному, они нуждаются в дальнейшем уточнении. Например, обращает на себя внимание увеличение фотопроводимости и фотовольтаического тока в ультрафиолетовой области спектра, соответствующее сильному поверхностному поглощению.

Результаты [8,9] обобщены в [7] - случай непироэлектрических кристаллов без центра симметрии. Разлагая ток по степеням внешнего поля

$$J = \sigma_{ij} E_k + \alpha_{ijk} E_j E_k^* \quad (1.11)$$

можно показать, что компоненты тензора третьего ранга α_{ijk} вообще говоря, отличны от нуля для кристаллов, принадлежащих к одной из 20 ацентричных групп точечной симметрии. Если внешнее поле является статическим, то (1.11) представляет собой квадратичную поправку к закону Ома. Если под E_k понимать компоненту поля световой волны, то, согласно (1.11), равномерное освещение однородного пьезоэлектрического кристалла приводит к появлению фотовольтаического тока. Как и в [8,9] микромеханизм фотовольтаического тока связан с асимметрией возбуждения и рекомбинация неравновесных носителей на примесных центрах. При этом фотовольтаический ток течет в направлении, в котором компонента тензора эффективного октупольного момента примесного центра отлична от нуля.

$$\tilde{Q}_{ijk} = \frac{1}{l^2} \left[d_i d_j d_k + \frac{l^2}{\sigma} \left(D_{ij} d_k + D_{ik} d_j + D_{kj} d_i + \frac{l^2}{10} Q_{ijk} \right) \right] \quad (1.12)$$

где d , D_{ij} и Q_{ijk} - соответственно дипольный, квадрупольный и октупольный моменты примесного центра.

В работах [7,9] теория эффекта была построена для линейного поляризованного света. Учет эллиптичности света с частотой ω , т.е. комлектности поля световой волны $E(\omega)$, приводит к принципиально новому

вкладу в фототок [9]. Согласно феноменологическому соотношению второго слагаемого

$$J_i = \alpha_{ijk}^s E_k E_j^* + i \alpha_{ij}^{as} [EE^*]_j, \quad \alpha_{ijk}^s = \alpha_{ikj}^s \quad (1.13)$$

промодулирован в пространстве и фототок

$$J_i(\omega) = i \alpha_{ij} [EE^*]_j, \quad c / E(\omega)^2 = 4\pi I \quad (1.14)$$

Здесь c - скорость света, I - его интенсивность.

Тензор фотовольтаического тока α отличен от нуля в кристаллах без центра симметрии, поскольку ток меняет знак при пространственных отражениях. Фототок (1.14) не однороден по пространству. Действительно, кристаллы без центра симметрии являются одноосными или двуосными кристаллами. Следовательно, собственными поляризациями кристалла являются линейные поляризации света и поле световой волны промодулировано по пространству:

$$\vec{E}(x) = E_l \vec{l}_l \exp(in_l \vec{q}\vec{x}) + E_0 \vec{l} \exp(in_0 \vec{q}\vec{x}) \quad (1.15)$$

Здесь E_l, E_0 - проекция электрического поля на оптические оси кристалла в точке $\vec{x} = 0, \vec{q} = \frac{2\pi}{\lambda}$, волновой вектор света. При подстановке (1.15) в (1.14) в [8] получен пространственно осциллирующий фотовольтаический ток

$$J_i(x) = \alpha_{i0l} E_l E_0^* \exp[i(n_l - n_0)] \vec{q}\vec{x} \quad (1.16)$$

Из (1.16) следует, что фототок осциллирует, когда координата \vec{x} меняется вдоль вектора \vec{q} с периодом $l_0 = \lambda(n_l - n_0^{-1})$. Такой фототок можно зарегистрировать в тонких пленках толщиной несколько микрон $l \leq l_0$ или в кристаллах с большим коэффициентом поглощения света [89].

$$(\alpha^*) \leq l_0, l_0 = \lambda(n_l - n_0)^{-1}$$

где α^* - коэффициент поглощения.

Для наблюдения объемного фототока можно использовать электроды в виде решетки с шагом l_0 . Фототок направлен вдоль вектора $|\vec{q} \times \vec{c}|$ (\vec{c} - ось кристалла) и должен приводить к оптической записи голографической решетки с шагом l_0 [5].

Микроскопический механизм эффекта связан с асимметрией процесса ионизации электронов и дырок. Процессы рекомбинации вклада в ток (1.16) не дают, поскольку при усреднении по поляризации света ток (1.16) обращается в нуль.

1.5 Постановка задач

Проведенный анализ теоретических и экспериментальных работ показывает, что АФН-пленка является перспективным элементом для оптоэлектроники как в качестве приемника оптического излучения автономного типа.

Разработанные АФН-приемники как приемники оптического излучения (ПОИ) наиболее целесообразно использовать там, где требуется отсутствия источника питания (при необходимости обеспечить повышенную взрывобезопасность) и высокая чувствительность ПОИ.

Технологический режим получения АФН-пленок зависит от большого числа параметров, таких как температура испарения и подложки, угол напыления, толщина пленки, состав и давление остаточных газов в вакуумной камере, условия термической обработки пленок после напыления, скорости и времени испарения, исходные массы материалов и т.п.

Исходя из вышеизложенных, в диссертационной работе были поставлены следующие конкретные задачи:

- Выбор оптимального технологического режима изготовления эффективных АФН-пленок из полупроводниковых соединений типа CdTe.

- Разработка методики увеличения аномального фотонапряжения в пленочных структурах.
- Исследование фотоэлектрических свойств АФН-пленок типа CdTe с примесью.
- Изготовление автономного ПОИ на основе АФН-пленки.
- Создание оптоэлектронных устройств для контроля оптических параметров жидких сред на основе светоизлучающего диода и АФН-приемника.
- Обоснование перспективы создания оптоэлектронного неразрушающего методов контроля технологических параметров веществ и материалов на основе АФН-приемника.

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

2.1 Методика технологии получения эффективных АФН-пленок

Для получения АФН-пленок из соединения $CdTe$, $CdTe:Cd$ нами использован метод термического испарения в вакууме. Вакуумная установка собрана на основе механического форвакуумного насоса типа РВН-4 и паромасленного диффузионного насоса (Тип Н-01), который обеспечивает давление порядка 10^{-4} мм рт. ст. В качестве испарителя использованы тигли и окиси алюминия или бериллия, изготовленные по методу [1].

Температура испарения полупроводника достигалась конструкцией тигля и регулированием тока. Подложки нагревались с помощью печки, конструкция которой дает возможность изменять температуру подложки до $600^{\circ}C$. Температура на подложке и испарителя контролировалась хромел-алюминиевыми термопарами, закрепленными непосредственно на них. В качестве подложек использовали стекло и кварц с прозрачными контактами.

Подложку очищали путем обработки в кипящем 0,5%-ном растворе азотной кислоты, затем обезжиривали в ацетоне и многократно кипели в дистиллированной воде, протирали медицинским спиртом и помещали их в камеру для испарения.

После достижения вакуума 10^{-4} мм. рт. ст. произвели обжигание подложек путем нагрева при температуре $300^{\circ}C$ в течении 30 минут.

В качестве исходного материала использовали порошкообразные $CdTe$ и $CdSe$ марки “для полупроводников”. До установления стационарного режима испарения тигель накрывали заслонкой, что дает возможность более точно контролировать время осаждения материала. Для сохранения состава шихты и начального потока испаряемого материала перед испарением шихты отжигали в режиме испарения в течение 20-25 минут. Малое расстояние между электродами при продольном режиме работы уменьшает электрическую прочность пленок, поэтому для получения пленок с большой толщиной и повышения температуры осаждения, а также во избежание уноса и прямого

попадания частиц к подложке поверхность тигля закрывали кварцевой пластинкой.

При применении соответствующих приспособлений нам удалось получить слои в широком диапазоне толщин (5-20 мм) и при высоких температурах подложки ($T=400^{\circ}\text{C}$).

В некоторых случаях для предотвращения отклонения от стехиометрического состава произведено подпылением S или CdS одновременно в процессе испарения. При испарении смеси порошков $CdS+CdSe$ также нарушалась стехиометрия. Материалы $CdSe$ и CdS в соответствующем количестве помещали в тигель и испарения производили одновременно. В пленках полученных такой методикой, электрофизические свойства колебались в довольно большом диапазоне. Для сохранения стехиометрии во всех образцах мы производили испарение по методу трех температур, используя два тигля: в один помещали $CdSe$, в другой CdS . Порошки $CdSe$ и CdS перед испарением обжигали в режиме испарения в течение 20 минут [5].

Использование двухтигельного способа получения пленок из $CdTe:Cd$ давало дополнительную возможность менять состав и получать пленки в широком диапазоне температуры подложек. Некоторые основные параметры пленок приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Основные параметры пленок

Номер образца	Температура подложки	Скорость испарения, мг мин.	Сопротивление образца, Ом
K31	100	3	10^5
K51	150	3	10^5
K53	150	0,5	5×10^5
K45	200	5	10^5
K47	200	3	10^6
K67	250	1	5×10^6
K65	250	5	10^6
K72	300	0,5	10^7
K75	300	6	10^6
K81	350	5	10^6
K93	400	3	10^7

Технологический режим получения таких пленок зависит от большого числа параметров, таких как температура испарения и подложки, толщина пленки, состав и давление остаточных газов в вакуумной камере, условия термической обработки пленок после напыления.

Оптимальные технологические параметры АФН-пленок, у которых фотонапряжения достигались до 1000 В/см^2 при комнатной температуре, следующие:

Таблица 2.2 – Параметры полупроводниковых материалов

Полупроводниковый материал	мм. Рт. Ст.	Т под °С	Угол напыления	Мкм
CdTe	10^{-4}	200÷250	35°	0,7÷1,5
CdSe	10^{-4}	200÷300	35°	0,7÷2,0

2.1.1 Технология изготовления пленок CdTe:Ag

Для получения контрольных и активированных АФН-пленок *CdTe:Ag* использована вакуумная установка типа ВУП-2К. В рабочей камере установки вакуум достигал порядка 10^{-4} - 10^{-5} мм.рт.ст. Вакуумная камера представляла собой стеклянный или кварцевый цилиндрический колпак диаметром 10 см и высотой 30 см., где производилось напыление исходного полупроводникового материала и примеси. В рабочей вакуумной камере на расстоянии 20-25 см от ее дна располагался держатель, выполненный в виде рамки, на которую крепились подложки. Расстояние между рамкой и тиглем было в пределах 8-10

см. Путем поворота держателя можно было изменять угол напыления от 0 до 90°. Температура подложки поддерживалась с помощью печки, надетой на кварцевый колпак. С помощью этой печки можно было менять температуру подложки от 20 до 600°C. для изменения температуры подложки использовались хромель-алюминиевые термопары. Для испарения полупроводникового материала *CdTe* и примесей *Ag* изготавливались тигли из вольфрамовой или молибденовой проволоки диаметром 0,6 мм в виде конусной корзиночки, поверхностная площадь которой равнялась 60 мм². На поверхность корзиночки наносилась водная суспензия окиси бериллия или окиси алюминия. После сушки на воздухе они отжигались в высоком вакууме при T=1300°C. Процесс повторялся до тех пор, пока не получился достаточный слой окиси. Затем тигель окончательно отжигался в вакууме при температуре 1600°C в течение 5 часов при постепенном повышении температуры. Тигли, изготовленные таким образом, были очень жаростойкими и удобными в использовании. С целью достижения более постоянного режима испарения в корзиночку загружалась навеска *CdTe* с таким расчетом, чтобы по окончании нанесения пленки неиспаренный остаток шихты в испарителе составлял примерно половину первоначального веса.

В качестве подложек использовалось стекло, толщиной 2-5 мм. Перед началом процесса вакуумного испарения стеклянные подложки промывались 2-3 раза в кипящей дистиллированной воде в течение 20-25 минут и сушились в сушильном шкафу при температуре 150°C в течение 30 минут, затем обжигались при 250-300°C в вакууме в течение 10 минут.

Подготовленные подложки помещались в специальный держатель и на поверхность подложки при температуре 200-300°C в вакууме порядка 10⁻⁴ - 10⁻⁵ мм рт. ст. Напылялась примесь серебра из отдельного тигля. Масса легирующего соединения, которая испарялась из другого тигля. Точное количество вводимой примеси установить было невозможно из-за сложности процесса осаждения металла на подложку, а время и скорость напыления определялись

экспериментально для получения наилучшей пленки с аномальными фотонапряжениями (АФН). Скорость конденсации $CdTe$, определенная из отношения толщины пленки ко времени напыления, составляла 3-5 нм/с. Толщина пленок определялась при помощи интерференционного микроскопа МИИ - 4 и МИИ - 5.

2.1.2 Методика увеличения АФН в пленочных структурах типа $CdTe$

Известно, что пленки, обладающие аномально высоким фотонапряжением (АФН), представляют собой функциональный преобразователь транстирующей световой поток в аномально большое фотонапряжение. В связи с этим исследования и изучения влияний внешних воздействий на свойства пленок играют немалую роль.

Исследованные АФН - пленки $CdTe$ получились из порошкообразного $CdTe$ в вакууме по оптимальной технологии. Температуры подложки 200-250°C, толщины пленок были в пределах $0,7 \div 1,5$ мкм.

Нами изучено влияние газового разряда и термообработки на электрофизические свойства АФН-пленок теллурида кадмия. Были изучены зависимости аномального фотонапряжения $V_{АФН}$, сопротивления R и тока короткого замыкания $J_{КЗ}$ пленок от времени напыления и от температуры подложки.

На рис.2.1 показаны зависимости $V_{АФН}$, R и $J_{КЗ}$ от времени напыления. Видно, что $V_{АФН}$ и R сначала увеличиваются с увеличением времени напыления, достигают своих максимальных значений после 10 минутного напыления, а затем значения $V_{АФН}$, R уменьшаются. Ток короткого замыкания практически не зависит от времени напыления. Такая зависимость $V_{АФН}$, R и $J_{КЗ}$ от времени напыления обнаружена также в работе [27], где были изучены влияния электронной и ионной бомбардировок на электрофизические свойства пленок кремния и германия.

Результаты, приведенные на рис.2.1 показывают, что при определенном интервале времени напыления можно получить эффективные АФН-пленки.

С целью выяснения характера поведения АФН-пленок при термообработке, а также влияния газового разряда на него исследовали температурные зависимости генерируемого фотонапряжения - $V_{\text{АФН}}$, тока короткого замыкания - $J_{\text{КЗ}}$ и сопротивления - R пленок теллурида кадмия. Пленки обрабатывали как на вакууме, так и на воздухе в течение одного часа в печи, конструкция которой дает возможность объемно изменять температуру до $\sim 400^\circ\text{C}$. В процессе термообработки полярность пленок оставалась неизменной, освещение при всех измерениях было постоянным $I=5 \times 10^4$ Лк.

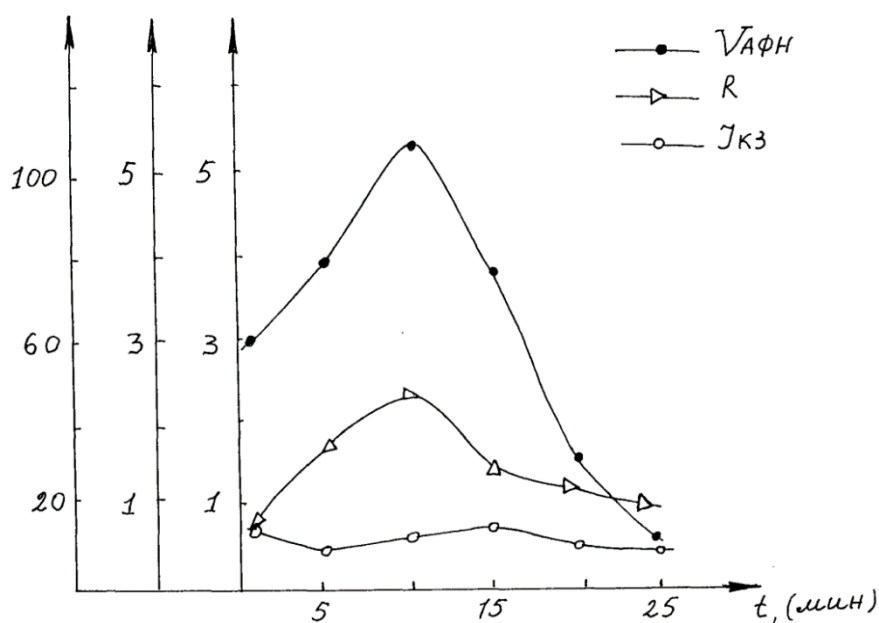


Рисунок 2.1 – Зависимость $V_{\text{АФН}}$, R и $J_{\text{КЗ}}$ от времени напыления

На рис.2.2. и рис.2.3 приведены зависимости $V_{\text{АФН}}$, R и $J_{\text{КЗ}}$ от температуры T при термообработке АФН-плёнок на воздухе и в вакууме. В следованных нами пленках, которые подвергались термической обработке на воздухе, фотонапряжение пленки сначала возрастало (рис 2.2, кривая 1), а потом уменьшался. Ток короткого замыкания с увеличением температуры до 200°C снижался (рис 2.3. кривая 3), сопротивления пленок при $50-100^\circ\text{C}$

повышалось (рис 2.3 кривая 2), в пленках обработанных в вакууме при 50-200⁰С фотонапряжение и сопротивление возрастало (рис. 2.3. кривая 1.2), ток короткого замыкания снижался (рис. 2.3. кривая 3). Дальнейшее увеличение температуры привело к уменьшению $V_{АФН}$, R , а ток короткого замыкания оставался неизменным. В процессе термообработки полярность пленок оставалось неизменной. Освещение при всех измерениях поддерживалось постоянным ($I=5 \cdot 10^4$ лк). В работах [38], где производились температурные измерения по АФН эффекту, отмечают, что с понижением температуры фотонапряжение и сопротивления пленок возрастают.

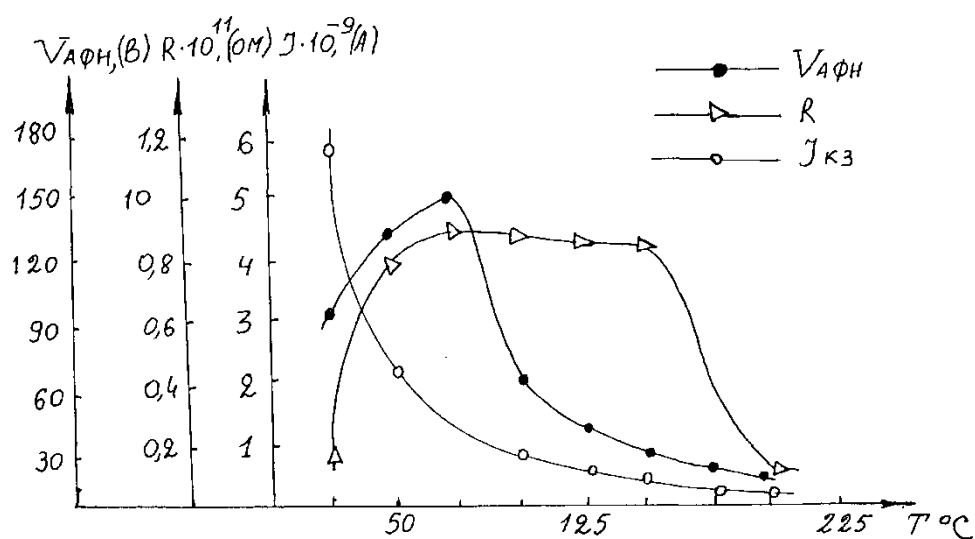


Рисунок 2.2 – Зависимость $V_{АФН}$, R и $J_{кз}$ от T (пленки обработались на воздухе)

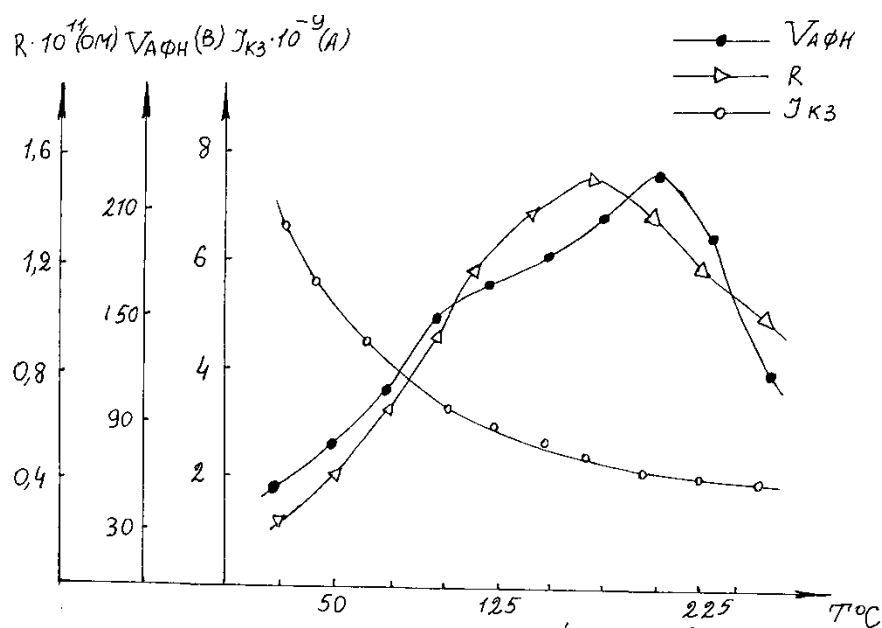


Рисунок 2.3 – Зависимость $V_{AФН}$, R и J_{K3} от T (пленки обрабатывались в вакууме)

Сравнение измерений, проведенные при обработке в воздухе и в вакууме, показывает, что при обработке в вакууме значения фотонапряжений в интервале температуры 25-225°C значительно превышают со значениями, измеренными при обработке на воздухе, а значения сопротивления превышают в интервале 100-200°C (см. рис. 2.2 и 2.3).

Изменение параметров АФН-пленок $CdTe$ от температуры, по-видимому, обусловлено их окислением, т.е. при термообработке появились прослойки, а при определенной температуре происходило насыщение. Увеличение значений $V_{AФН}$, R при обработке в вакууме можно объяснить с десорбцией кислорода в исследованных образцах. Таким образом, при действии газового разряда на пленку наблюдаются изменения основных характеристик пленок, что связано с абсорбцией и десорбцией кислородных атомов и действием катодных ионов на свойство пленок.

Нами исследованы три способа активизации АФН-пленок:

1. Первоначально на подложку напыляется тонкий слой серебра толщиной $1-2 \overset{o}{A}$, затем на эту поверхность пленки напыляется теллурид кадмий. После напыления теллурида кадмия проводится термическая обработка в вакууме.

2. В процессе конденсации слоя $CdTe$ производилось одновременное легирование на подложку путем напыления Ag из отдельного тигля.

3. Изготовление механической смеси теллурида кадмия и серебра путем перемешивание их порошков с последующим напылением в течении часа в вакууме 10^{-4} мм. рт. ст. При этом температура подложки поддерживались $T_n=200^{\circ}C$.

Проведенные на большом числе образцов исследования показали, что наиболее эффективными являются первый и второй методы. При этом пленки обладают наиболее стабильными фотовольтаическими свойствами. При освещении их источником света интенсивностью $\sim 8 \cdot 10^{-2}$ Вт/см² генерировались АФН до 800 В на 1см² образца при комнатной температуре.

Вольтамперные характеристики всех исследованных АФН - пленок при комнатной температуре в интервале значений освещенностей $I = 3,5 \cdot 10^4$ Лк и напряженностей электрического поля $E = 10^3$ В/см подчиняются закону Ома.

Люкс-вольтовые характеристики существенно нелинейны, и фотонапряжение практически достигает насыщения при освещенностях порядка 10 Лк. Быстрый выход люкс-вольтовых зависимостей на насыщение обеспечивает стабильность оптоэлектронных систем к изменениям освещенности.

При освещении обратной стороны АФН - пленки источником света интенсивностью $\sim 8 \cdot 10^{-2}$ Вт/см² генерировались АФН до 300 В на см². Это свидетельствует, что при отражении света тоже генерируется АФН. Если покрыть обратной стороны стеклянной или кварцевой подложки отражающим покрытием Ag , значения АФН - должен меняться. При нанесении на одну сторону стеклянной подложки фоточувствительного слоя термическим испарением кристаллического теллурида кадмия подложку располагают под углом 45° к направлению молекулярного пучка для того, чтобы создать поверхностную угловую анизотропию, ответственную за возникновение аномального фотонапряжения, при этом оптимальным является расположение подложки под углом 45° к направлению молекулярного пучка, при нанесении

на противоположную сторону стеклянno подложки отражающего слоя из серебра процесс ведут при давлении 10^{-4} мм.рт.ст. и температуре подложки 250-600°C для того, чтобы уменьшить окисление отражающего слоя из серебра.

На рисунке 2.4. приведено изображение аномально фотонапряженной пленки: 1 - фоточувствительный слой из кристаллического теллурида кадмия; 2 - стеклянная подложка; 3 - отражающий слой из серебра; 4-- металлические контакты; Φ_0 поток падающего света; Φ_1 - поток света, прошедшего через слой пленок CdTe, Φ_2 - отражающий поток от серебряного покрытия.

Падающий поток света Φ_0 , генерирует фотонапряжение АФН, Часть потока света Φ_1 проходя через подложку, попадает на слой серебра, и отражаясь, попадает на обратную сторону пленки теллурида кадмия, в результате чего получается дополнительное поглощение света и в связи с этим увеличивается генерируемое фотонапряжение $V_{\text{АФН}}$.

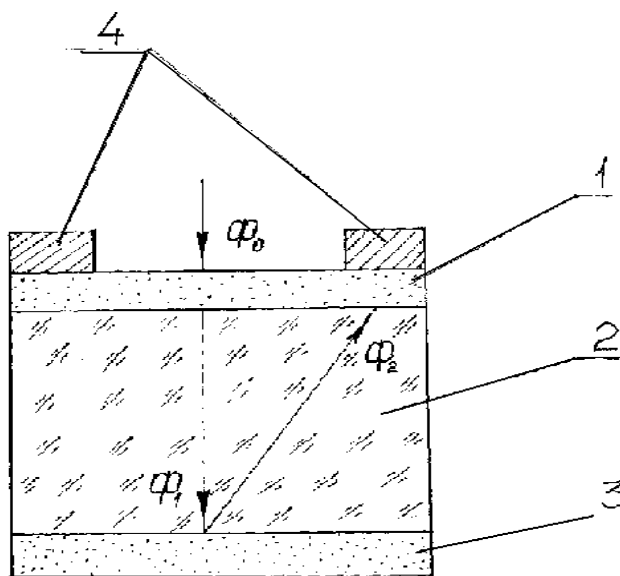


Рисунок 2.4 – АФН-пленка с отражающим серебряным слоем:

1 - фоточувствительный слой на CdTe, 2 - стеклянная подложка,
3 - отражающий слой из серебра, 4 -металлические контакты, Φ - падающий
поток света, Φ_1 - проходящий поток через слой CdTe, Φ_2 - отражающий поток
из Ag

Способ осуществляется в следующей последовательности: на одну сторону стеклянной подложки, расположенной под углом 45° к направлению

молекулярного пучка, при температуре 420-600°C и давлении 10^{-5} мм.рт.ст. наносят слой из теллурида кадмия толщиной 0,2 мкм, затем на противоположную сторону стеклянной подложки наносят отражающий слой из серебра толщиной 1 мкм термическим испарением при температуре подложки 250 - 300 °C и давлении 10^{-4} мм.рт.ст.

Пример 1. Фоточувствительный слой наносят термическим испарением кристаллического теллурида кадмия на стеклянную подложку при температуре 400°C, в вакууме 10^{-4} мм.рт.ст., расположении под углом 45° к направлению молекулярного пучка. Толщина пленки из теллурида кадмия составляет 0.2 мкм. затем на противоположную сторону стеклянной подложки наносят отражающий слой из серебра термическим испарением при температуре подложки 250°C, вакууме 10^{-4} мм.рт.ст. Толщина пленки составляет 1 мкм. Величина аномального фотонапряжения 215 вольт при освещенности 10^4 лк.

Пример 2. Фоточувствительный слой наносят термическим испарением кристаллического теллурида кадмия на стеклянную подложку при температуре 500°C, вакууме 10^{-5} мм.рт.ст. расположенного под углом 45° к направлению молекулярного пучка. Толщина пленки из теллурида кадмия составляет 0,2 мкм. затем на противоположную сторону стеклянной подложки наносят отражающий слой из серебра термическим испарением при температуре 270°C, вакууме 10^{-4} мм.рт.ст., толщина пленки составляет 1 мкм. Величина аномального фотонапряжения после нанесения отражающего слоя 420 вольт при освещенности 10^4 лк.

Пример 3. Фоточувствительный слой наносят термическим испарением кристаллического теллурида кадмия на стеклянную подложку при температуре 490°C, вакууме 10^{-5} мм.рт.ст., расположенного под углом 45° к направлению молекулярного пучка, толщина пленки теллурида кадмия составляет 0,2 мкм. Затем на противоположную сторону стеклянной подложки наносят отражающий слой из серебра термическим испарением при температуре 300°C, вакууме 10^{-4} мм.рт.ст., толщина пленки составляет 1 мкм. Величина

аномального фотонапряжения после нанесения отражающего слоя 480 вольт при $I = 10^4$ лк.

Пример 4. Фоточувствительный слой наносят термическим испарением кристаллического теллурида кадмия на стеклянную подложку при температуре 600°C , вакууме 10^{-5} мм.рт.ст., расположенного под углом 45° к направлению молекулярного пучка, толщина пленки теллурида кадмия составляет 0,2 мкм. затем на противоположную сторону стеклянной подложки наносит отражающий слой термическим испарением серебра, при вакууме 10^{-4} мм.рт.ст. и температуре подложки 320°C . Толщина пленки составляет ~ 1 мкм. Величина аномального фотонапряжения после нанесения отражающего слоя 120 вольт при освещенности 10^4 лк.

В фотогенераторах на основе пленок теллурида кадмия герметичность фоточувствительного слоя повышает надежность и стабильность выходных характеристик и, кроме того, зеркальная поверхность позволяет увеличить фоточувствительность при малых интенсивностях света. Сравнение $V_{\text{АФН}}$ АФН-пленок, полученные до и после нанесения покрытия серебра, приведено в табл. 2.3.

Таблица 2.3 – Сравнение $V_{\text{АФН}}$ АФН-пленок

№ пленки	$V_{\text{АФН}}$ (В) до нанесения	$V_{\text{АФН}}$ (В) после нанесения
24	350	430
61	800	1000
77	60	70
89	400	480
90	500	600

Эти результаты показывают, что после нанесения серебряного покрытия на обратную сторону подложки, аномальное фотонапряжение увеличивается до 25%.

2.2 Получение отражающих серебряных покрытий ионной бомбардировкой

Следует отметить, что пленки серебра, нанесенные методом напыления, обладают плохими адгезионными свойствами. Ионная бомбардировка твердых тел является одним из наиболее эффективных методов воздействия получить пленки с улучшенной структурой и хорошей адгезией к подложке [10-12].

Для получения отражающих серебряных покрытий методом ионной имплантации атомов отдачи нами был изготовлен экспериментальный прибор и собрана вакуумная система, обеспечивающая необходимое давление. Принципиальная схема установки изображена на рис. 2.5.

С целью повышения адгезионных свойств серебряных пленок поверхность подложки облучалась одновременно ионными пучками при нанесении серебряных покрытий [13].

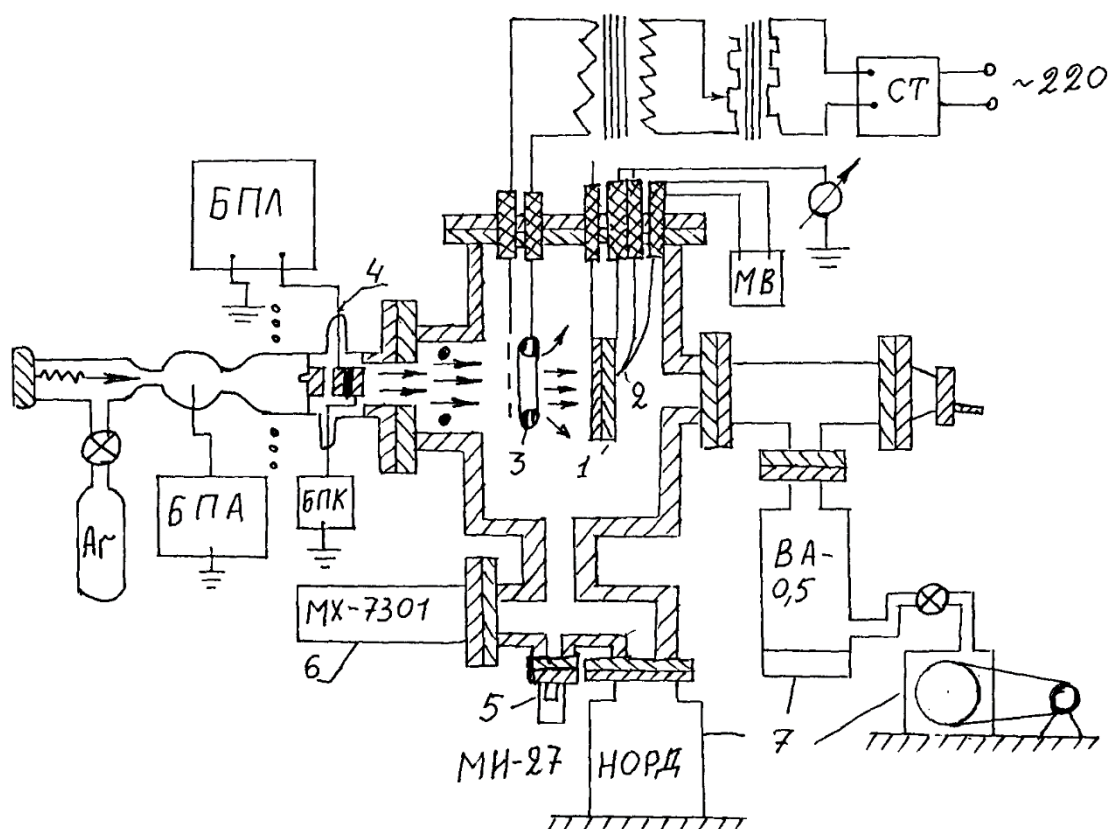


Рисунок 2.5 – Схема металлической экспериментальной установки:

- 1 -мишень, 2-термопара, 3-распылитель, 4-ионный источник,
- 5-манометрическая лампа МИ-27, 6-датчик масспектрометра,

7-вакуумные насосы.

В этом случае основные требования к экспериментальной аппаратуре и методикам исследований были следующие:

1. В измерительной камере должен поддерживаться максимально достижимый вакуум для проведения исследований с чистыми поверхностями.
2. Испаритель должен давать равномерное покрытие, обеспечивать стабильную скорость напыления в широком диапазоне, не мешать прохождению ионного потока при одновременной работе с ионным источником, не давать большого количества посторонних примесей.
3. Измерительная аппаратура должна обладать минимальной инерционностью, высокой чувствительностью и обеспечивать качественную и количественную оценку исследуемых процессов.

2.2.1 Экспериментальные камеры и измерительная аппаратура

В наших исследованиях использовалась металлическая установка, общий вид которой приведен на рис 2.5. Установка состоит из измерительной камеры, монопольного масс-спектрометра МХ-7301, высокочастотного ионного источника, системы вакуумной откачки и системы напуска газа.

В измерительной камере объемом 3,5 л., изготовленной из нержавеющей стали, смонтирована мишень (1) с платино-платинорадиевой термопарой (2), термический распылитель (3), высокочастотный ионный источник с ионно-оптической системой ускорения и датчика манометра МИ-27 для измерения давления (5). Все уплотнения - металлические, выполненные из меди.

Скорость напыления регулируется измерением температуры испарителя за счет изменения удельной мощности, подаваемой на испаритель, питание осуществляется через систему стабилизатора, ЛАТРа и понижающего трансформатора.

Оригинальность такого устройства в том, что с его помощью можно получать многослойные структуры, изменять физические свойства пленок в широком интервале регулируя скорость испарения и ионный поток: передавать

последовательность напыления и бомбардировки и тем самым получать определенные, наперед заданные свойства пленок и вводить примеси с коэффициентом прилипания, близким к нулю.

Для изучения спектров остаточных газов применялся монопольный масс-спектрометр МХ-7301 с выходом на самописец, представляющий собой динамический прибор, основанный на разделении ионов по величине отношения заряда к массе иона в поперечном гиперболическом высокочастотном электрическом поле. Диапазон масс - до 100, разрешающая способность $M+M=2M$, чувствительность по аргону 1×10^{-5} А/мм. рт. ст. Спектры масс записывались на потенциометре КСП2-003.

Для получения положительных газовых ионов применялся безэлектродный газоплазменный источник высокочастотного типа, который позволял получать ионный ток на мишени до 40 мкА/см^2 с возможностью регулировки энергии ионов $0,1 \div 3$ кэВ. Источник состоит из двух частей: разрядной камеры и электронно-оптической системы ускорения и фокусировки. На разрядную камеру надевается катушка, являющаяся контуром высокочастотного генератора для возбуждения Н-разряда.

В качестве источника высокочастотных колебаний служит генератор с самовозбуждением, собранный по двухтактной схеме на лампах ГУ-50, частота колебаний 38-40 МГц, мощность - 75 Вт, анодное напряжение 500-600 В подводится через дроссель, изготовленного из медного стержня диаметром 5 мм, изогнут в форме спирали Архимеда для уменьшения разброса энергии ионов, питание от УНПа.

В разрядной камере находится вытягивающий электрод с каналом диаметром 2мм для выхода ионов и создания перепада давлений между камерой и источником. С помощью поджигающего электрода плазмы сообщается положительный потенциал относительно вытягивающего электрода, выполненного из алюминия для уменьшения коэффициента катодного распыления.

Для ускорения и фокусировки ионного пучка применяются электронно-оптическая система линз типа одиночной линзы.

Ионный ток на мишень измеряется микроамперметрами типа М 1692-7; Ф-116-1; Ф-116-1; Ф-118; с погрешностью до $\pm 2\%$.

Температура подложки и испарителя измерялась с помощью платино-платинородиевой термопары на микровольтметрах типа Ф-116. Питание поджигающего электрода осуществлялось от повышающего трансформатора с системой выпрямления, на вытягивающий электрод подавалось регулируемое стабилизированное напряжения от 0,1 до 3кэВ с помощью приборов типа ТЗС-9 и - 24: фокусировка осуществлялась от блока ВСЭ-2500 в диапазоне 0,5-2,5 кВ.

Вакуумная система (рис. 2.6) состоит из механического форвакуумного насоса ВН-462 (1), четырехкодового вакуумного металлического крана и вакуумного вентиля типа ВРП 32-2 (2), а также высоковакуумного вентиля (3). Система высоковакуумной откачки состоит из вакуумного агрегата ВА-0,5-4 (4) с азотной и титановой ловушками (5) и магниторазрядного насоса типа НОРД-250 (6).

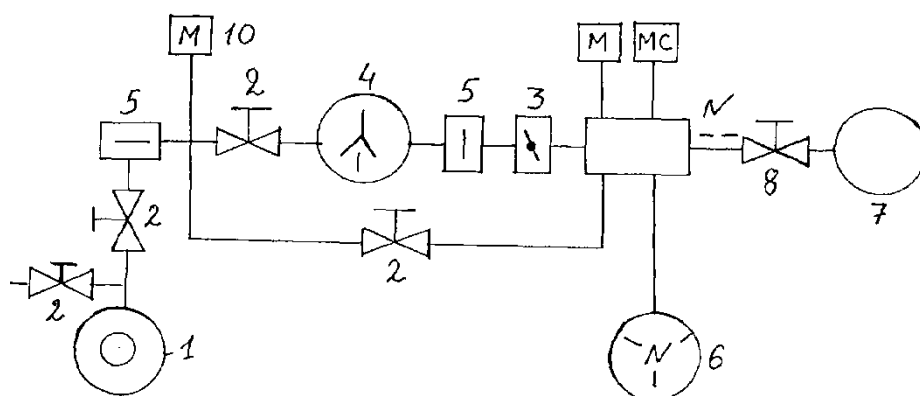


Рисунок 2.6 – Схема вакуумной системы экспериментальной установки:

1-форвакуумный насос, 2-вентиль форвакуумный, 3-вентиль высоковакуумный, 4-диффузный насос, 5-ловушки, 6-магниторазрядный насос НОРД, 7-баллон с газом, 8-натекатель игольчатый, 9-лампа термопаров ПМТ-2, 10-лампа манометрическая МИ-27.

Система напуска газа, состоящая из металлического балончика (7) для газа с вентилем и манометрами, игольчатого натекания типа Б-23 (8) с иглой из нержавеющей стали и седла из свинца, позволяет регулировать давление в камере с очень большой точностью в широком диапазоне. Измерение давления производилось датчиками (9) и (10).

Титановый насос имеет водяное охлаждение, прогрев стенок камере производился нихровым нагревателем, изготовленным из проволоки 1-1,5 мм, с питанием от ЛАТРа. Предельный вакуум после предварительного обезгаживания металлической камеры был порядка 10^{-4} Па.

2.2.2 Экспериментальные методики

Методический эксперимент проводили в следующем порядке: обезжиренную четыреххлористым углеродом и промытую в спирте. Стекло укрепляли в держателях, устанавливали распыляемый металл и термопару. Камеру откачивали, предварительно скачав трубку между натекателем и баллончиком с газом, промыв камеру аргоном, включали прогрев для обезгаживания стенок камеры и титановый насос. После достижения предельного вакуума напылялась пленка, время напыления определялось по секундомеру. Потом выключался ионный источник, производился напуск газа до 10^{-3} Па (10^{-5} -тор), зажигалась плазма, ионный пучок вытягивался на поверхность мишени.

При изучении влияния ионного облучения на формирование тонких пленок включались все приборы, питающие напыления и бомбардировку, устанавливался ионный ток с заданными параметрами и сразу же устанавливались параметры напыления пленки. Затем выключался и настраивался масс-спектрометр, снимался спектр фонового давления.

Для исследования механических свойств пленок, полученных при одновременном напылении и облучении аргоном, мы провели ряд экспериментов по получению пленок с различными параметрами облучения - энергией ионов, времени облучения, а вследствие этого и разными скоростями

роста пленок при почти одинаковых скоростях напыления. Все эти данные представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 –Параметры напыления и одновременного облучения серебряных

№ эксперимент.	№ образца	Температура подложки, °С	Плотность тока, мкАсм ⁻²	Время облуч., мин.	Время напыл., мин.	Доза облучения, ион/см ²
1	95	600 ⁰	0,2	15	30	1,125·10 ¹⁵
2	04	500 ⁰	0,1	15	30	5,6·10 ¹⁴
3	92	600 ⁰	0,4	15	45	25·10 ¹⁵
4	01	500 ⁰	0,1	30	30	1,125·10 ¹⁵
5	93	600 ⁰	0,2	30	45	2,25·10 ¹⁵
6	96	2000	0,1	30	30	1,125·10 ¹⁵
7	91	600	0,6	30	30	6,75·10 ¹⁵

пленок

Были проведены испытания полученных пленок на износостойкость на приборе МТПО при нагрузке 0,5 кг при коэффициентах трения 0,2 и 0,4 и при использовании индикатора из алюминия с покрытием из эпоксиролиуретана “Эпол” который представляет собой продукт поликонденсации эпоксидной смолы ЭД-5 и полуэфира П-6 с продуктом 102-Т и сшивающим агентом метафенилендиамином.

Чтобы исключить при разработке технологии нанесения имплантационного слоя ряд факторов, связанных с кривизной поверхности (неравномерность бомбардировки, погрешности изготовления испытываемых образцов и т.д.) была выбрана машина трения, испытывающая плоские поверхности. Чтобы обнаружить эффекты упрочнения стояла задача выбрать машину, испытывающую не только плоские поверхности, но и с малыми нагрузками.

Для проведения испытаний была использована МТПО (машина трения для плоских образцов).

Установка состоит из основного механизма, электропривода и микрометрического устройства для измерения тангенциального усилия.

Микрометрические устройства дублируются тензометрическим, датчики которого смонтированы непосредственно на узле крепления образца.

Характеристика машины трения следующая:

Диапазон измерения нагрузки 0,1-20 кгс

Диапазон измерения скорости образца 0-1,5 м/сек.

Порог реагирования момента измерителя -0,1 кгс/см

Погрешность скорости - 0,01 м/сек.

Нагрузка N на испытываемый образец создавалась прижимным устройством при помощи пружины.

Коэффициент трения $K_{тр}$ находился при помощи выражения

$K_{тр} = \text{усилие сдвига} / \text{нагрузка на образец}$

Для определения величины усилия сдвига образца, испытывавшего в процессе трения в паре с притираемым диском нагрузки N , использовались зависимость между сопротивлением перемещению диска и его положением. Изменение положения диска фиксировалось индикатором. Взвешивание образцов до и после испытания производилась на аналитических весах АВ-200.

Для проведения испытаний образцы приклеивались клеем ЭПО к цилиндрическим держателям высотой 5 мм и диаметром 21 мм. Размеры образцов $8 \times 10 \text{ мм}^2$. предварительно образцы маркировались.

Следует отметить, что пленка серебра нанесенный без ионного облучения обладает плохими адгезионными свойствами. Поэтому мы их не исследовали на износостойкость.

Изучение износостойкости серебряных пленок, полученных при одновременном облучении аргоном с различными параметрами облучения и сравнительные данные для стеклянной подложки, представлены в таблице 2.5. Исследуем эти данные. Из сравнения экспериментов №4, 6 и 7, видно, что при одновременной бомбардировке и напылении и $i = \text{const}$ без дополнительного напыления минимальный износ при энергии ионов $E = 2000 \text{ эВ}$, максимальный

при $E = 300$ эВ. Сравнение экспериментов 2 и 4 показывает, что при $E, i = \text{const}$ запыление сверху пленкой без облучения приводит к увеличению износостойкости. Из экспериментов 1 и 5 видно, что при $E, i = \text{const}$ и напылении сверху пленкой без облучения наблюдается большой эффект в увеличении износостойкости при большой дозе облучения.

При сравнении экспериментов 1, 3, 5, 7, $i = \text{const}$, $E = 600$ эВ изменяется плотность тока от 0,2 до 0,6 МКА см⁻², при этом трудно интерпретировать результаты, т.к. время облучения разное. Кроме того было проведено запыление пленкой без ионного облучения в экспериментах 1, 2, 5 и в эксперименте 7. без напыления. При этом обнаруживается тенденция увеличения износостойкости с увеличением дозы.

Все вышеизложенное верно в предположении, что скорости испарения одинаковы. В действительности в эксперименте очень трудно добиться идентичной скорости испарения резистивным способом. Поэтому оказалось, что скорости испарения в экспериментах 2 и 4 немного меньше средней скорости для остальных экспериментов, а в эксперименте 7 немного больше. Влияние скорости испарения на износостойкость нами, к сожалению, не исследовалось. В дальнейшем предполагается провести подробные исследования.

3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1 Кинетика АФН-эффекта в пленках типа CdTe

Из анализа многих теоретических и экспериментальных фактов следует, что в пленках типа CdTe АФН-эффект обусловлен микро p-n- переходным механизмом.

На основе p-n- переходной модели можно видеть, что линейность вольтамперных характеристики связана с последовательным включением большого числа ($\sim 10^5$) p-n и n-p-переходов, на каждый из которых падает

$\frac{kT}{q}$

смещающее напряжение 0,1 В, т.е. $< \frac{kT}{q}$.

Мы получили АФН-пленки из полупроводникового материала CdTe, CdSe, CdTe: Ag и исследовали их вольт-амперные, люкс-вольтовые и температурные характеристики. Генерирующие напряжения регистрировали электрометром В7-30. [1].

Согласно [2,3], определенные выводы о природе явления можно сделать на основе зависимости фотонапряжения от угла падения света. Если наблюдается инверсия знака фотонапряжения в пределах 0-180°, это свидетельствует о фотодиффузионном (демберовском) механизме АФН-эффекта если при изменении угла падения в указанных пределах инверсия знака фотонапряжения не имеет места, тогда АФН-эффект связан с p-n-переходным механизмом.

В полученных пленках CdTe, CdTe: Ag АФН-эффект можно объяснить моделью p-n-переходов, так как на кривых $V_{\text{АФН}}$ не наблюдается инверсия фотонапряжения.

В пленках CdTe, CdTe: Ag не наблюдается аддитивность фотонапряжения, даже в тех случаях, когда фотонапряжение имеет одинаковую полярность при освещении с фронта и тыла. Этот характер можно объяснить на основе p – n – переходной модели, согласно представлению, что АФН-пленка

состоит из активного при поверхностного и неактивного объемного слоев, как отмечено в работе [4] для CdTe.

В фотовольтаически неактивном слое при освещении с тыла происходит частичное поглощение света, поскольку этот слой обладает фотопроводимостью, он действует как шунт, снижающий генерируемое напряжение.

Если в пленках наблюдается аддитивность фотонапряжений при тыловом и фронтальном освещении, то это связано с отсутствием в них процесса шунтирования фотонапряжения фотопроводимостью “объема” пленки.

Анализ температурных зависимостей $V_{\text{АФН}}(T)$ показывает [5], что практически для пленок всех материалов они совпадают с зависимостями, $R(T)$ указывает, что первичным процессом в АФН-эффекте является генерация фототока, а фотонапряжение – результат протекания фототока в фотогенераторе с большим внутренним сопротивлением.

Вольтамперные характеристики исследованных пленок оказались линейными до фотонапряжений 500 В/см.

В исследованных нами пленках, которые подвергались термической обработке на воздухе, фотонапряжение пленки сначала возрастало (рис 2.2. кривая 1), а потом уменьшался. Ток короткого замыкания с увеличением температуры до 200⁰С снижался (рис.2.2, кривая 3), сопротивление пленок при 50-100⁰С повышалось (рис.2.2, кривая 2). В пленках, обработанных в вакууме при 50–200⁰С фотонапряжение и сопротивление возрастало (рис.2.3., кривая 1 и 2), ток короткого замыкания снижался (рис.2.3, кривая 3). Дальнейшее увеличение температуры привело к уменьшению $V_{\text{АФН}}$, R , а ток короткого замыкания оставался неизменным. В процессе термообработки полярность пленок оставалось неизменной. Освещение при всех измерениях поддерживалось постоянным ($I = 5 \cdot 10^4$ лк).

Проанализировав графики температурных зависимостей можно считать, что АФН-эффект в пленках типа теллурид кадмия связан с суммированием

напряжений $p - n$ переходов, образующихся на границе гексагональной (0001) и кубических фаз (111) [103]. Следует отметить, что АФН – эффект в пленках $CdTe : Ag$ и других сложных полупроводниковых соединениях тоже связан с $p - n$ – переходным механизмом.

Удельное сопротивление пленок, вычисленное по измеренному значению ρ и геометрии пленок, на несколько порядков больше удельного сопротивления исходного материала, это свидетельствует о наличии в АФН-пленках высокоомных прослоек. Для демберовского механизма АФН-эффекта роль таких прослоек принципиально важна, так как они препятствуют обмену носителями тока между соседними фотоактивными микроэлементами. В пленках с $p - n$ – переходным механизмом АФН-эффекта роль таких прослоек не принципиальна. Таким образом, пленка представляет собой батарею, состоящую из N – активных участков разделенных прослойками.

В АФН – пленках типа $CdTe$ возможность образования $p - n$ – переходов можно объяснить тем, что дефект упаковки в кубической гранецентрированной структуре (г.ц.к) представляет собой расположение нескольких атомных слоев. В последовательности соответствующей гексагональной плотноупакованной структуре, относительно в которой имеется зеркальное отражение. Остальные плоскости г.ц.к структуры и области, разделяемые дефектом упаковки обладают p и n типом проводимости. p -типом проводимости обладают области при локальном отклонении состава от стехиометрического в сторону Te , а n -типом в сторону Cd .

На рис.3.1 схематически изображена наклонно-напыленная пленка $CdTe$, в которой обратная сторона подложки покрыта серебром. Роль серебряного покрытия заключается в том, что при вертикальном освещении пленки часть излучения проходя через пленку отражается от покрытия. Вследствие чего, отраженное излучение вновь попадет в пленку, что приводит к появлению дополнительных электронно-дырочных пар. Кристаллиты данной пленки наклонены в сторону испарителя, но угол их наклона (ψ) меньше угла наклона падения парового потока (ψ_0) относительно нормали к плоскости

подложки, что соответствует, исследованным в данной работе, пленкам, конденсированным под углом $\psi_0 = 25^\circ$ в интервале $T_n = 150 \div 300^\circ\text{C}$.

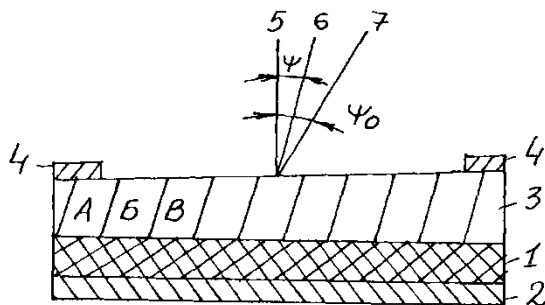


Рисунок 3.1 – Наклонно напыленная пленка CdTe:

1–подложка; 2–серебряное покрытие; 3–пленка; А,Б,В... – кристаллиты;
4–контакты; 5–нормаль к плоскости подложки; 6–направление оси текстуры [111]; 7–направление падения парового потока при осаждении пленки

В кристаллитах пленки по плоскостям (111) образуются двойниковые дефекты упаковки, на которых возникают р – п – переходы. Предполагается, что потенциальные барьеры на этих р-п-переходах являются неодинаковыми (рис.3.2.). С отдалением от подложки к поверхности пленки они увеличиваются.

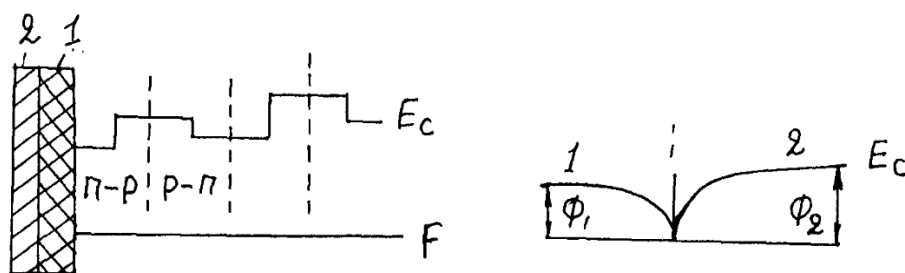


Рисунок 3.2 – Схематическое изображение зоны проводимости (E) р-типа пленки CdTe:

а – р-п-переходы на двойниковых дефектах упаковки одного из кристаллитов, представленных на рис.3.1; F - уровень Ферми;
б – потенциальный барьер на поверхности раздела кристаллитов 1 и 2, где Φ_1 и Φ_2 - высота потенциальных барьеров для этих кристаллитов, соответственно.

Кроме того, уровень Ферми смещается ближе к валентной зоне. Причиной увеличения барьеров и смещения уровня Ферми могут быть: увеличение совершенства кристаллической структуры пленки от подложки к ее поверхности; (ближе к подложке пленка является менее совершенной), изменение состава испаряемой шихты во время конденсации пленок и другие. До освещения пленки носители заряда находятся в потенциальных ямах, а система р-п-переходов – в равновесном состоянии. При освещении пленки происходит перераспределение электронов и дырок на р-п-переходах. Каждый р-п-переход становится микрофотоэлементом. При этом на соседних переходах (р-п- и п-р-) возникают фото-эдс противоположных знаков. На переходах, находящихся ближе к поверхности пленки, из-за более высоких потенциальных барьеров возникают фото-эдс, абсолютные величины которых больше, чем на соответствующих (р-п и п-р-) переходах, находящихся ближе к подложке.

Ввиду того, что потенциальные ямы являются асимметричными (рис.3.2.) движение избыточных дырок будет направлено к поверхности кристаллита, а электронов – к подложке. В результате часть кристаллита, находящаяся у поверхности пленки, заряжается положительно, а у подложки – отрицательно. Величины зарядов на кристаллитах, находящихся ближе к испарителю, должны быть большими, чем на кристаллитах, находящихся дальше от испарителя, так как размеры кристаллитов в кристаллографическом направлении (111), расположенных ближе к испарителю, являются большими. Потому что кристаллиты содержат больше двойниковых дефектов упаковки и р-п-переходов с более высокими потенциальными барьерами, обеспечивающими более высокие значения фото-эдс. В связи с этим вдоль подложки больше вероятности наличия между этими кристаллитами асимметричных потенциальных барьеров [6] Схематическое изображение такого барьера для зоны проводимости между двумя кристаллитами, находящимся дальше и ближе к испарителю, соответственно, представлено на рис.3.2.. До освещения пленки носители заряда находятся в потенциальных ямах. При освещении пленки через барьер из кристаллита 1 перейдет больше

дырок (p_1) в кристаллит 2, чем из кристаллита 2 в кристаллит 1 (p_2), так как для дырок p_1 потенциальный барьер ниже, чем для дырок p_2 . Аналогично, учитывая переходы дырок (и электронов в противоположном направлении) на всех потенциальных межкристаллических барьерах, в результате получим отрицательный заряд на конце пленки, расположенном дальше от испарителя, а на более близком испарителю конце – положительный.

Выражение для сопротивления такой системы можно представить в виде

$$R = N \left(R_1 e^{\frac{E_1}{kT}} - R_2 e^{\frac{E_2}{kT}} \right) \quad (3.1)$$

где, k - постоянная Больцмана, e -заряд электрона E_1 и E_2 - энергия активации материала пленки и прослойки,

$$R_1 e^{\frac{E_1}{kT}} \gg R_2 e^{\frac{E_2}{kT}}$$

Выражение для фотонапряжения холостого хода с N микро-р-п-переходами можно записать в виде

$$V_{xx} = N \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_{\text{TM}}}{I_s} + 1 \right) \quad (3.2)$$

где: $I_{\text{ф}}$ - полный поток фотодырок в стороне освещения. I_s - ток насыщения при р-п-переходе.

Величина фототока почти не изменяется с температурой (2), температурная зависимость тока насыщения соответствует формуле

$$I_s = A \cdot e^{-\frac{\Delta E}{kT}} \quad (3.3)$$

где, A - величина независимая от температуры.

Поскольку вольтамперные характеристики АФН-пленок линейны, то можно записать

$$I_{k3} = \frac{V_{xx}}{R_n} \quad (3.4)$$

Для того, чтобы ток короткого замыкания слабо зависел от температуры, необходимы чтобы $E_1 < E_2$ в (1, 2) и работа переходов в режиме малого уровня генерации $I_{\phi} / I_s < 1$, следовательно

$$I_{K3} = \frac{kT}{e} \frac{I_{TM}}{I_s R_n}; \quad R_n = R_1 + R_2 \quad (3.5)$$

Это условие выполнимо тогда, когда в полупроводниковых пленках теллурида кадмия с серебряными покрытием полученных на подложках, сильна компенсация акцепторных и донорных примесей. Для монокристаллов теллурида кадмия она приблизительно совпадает в вычисленным из сопротивления АФН-пленки ($\sim 10^9$ Ом/см). Сопротивление пленки не зависит от сопротивления напыляемого материала. При тех условиях, для которых получена формула (5), температурные зависимости V_{xx} и R могут быть представлены в виде

$$V_{xx} = N \frac{kT}{e} \frac{I_s}{A} e^{\frac{\Delta E}{kT}} \quad (3.6)$$

$$R = R_n \cdot e^{\frac{\Delta E}{kT}} \quad (3.7)$$

Экспериментальные данные, приведенные выше для CdTe: Ag, достаточно хорошо описываются полученными выражениями (1÷7) и подтверждает что в пленках типа CdTe возникновение АФН происходит микро р-п-переходами.

3.2 Поглощение излучения в пленках CdTe:Ag

Край спектральных зависимостей оптических постоянных в области края поглощения является весьма эффективным методом исследования особенностей дефектности строения энергетических зон в тонких пленках. В связи с этим нами были измерены коэффициенты пропускания при разных скоростях конденсации. Как известно коэффициент пропускания зависит от

оптических постоянных: показателя преломления пленок (n) и коэффициент экстинкции (k), толщины пленки (d) и длины волны света (λ), а также от показателя преломления подложки (n_s) [63].

На рис.3.3 представлена зависимость T от энергии кванта света ($h\nu$) для пленок CdTe:Ag, полученных при разных скоростях конденсации (см. табл.3.1). Из рисунка видно, что в длинноволновой области спектра в пленках наблюдается интерференция. Для пленок, полученных со скоростью конденсации 0,2 и 1,73 нм/с в области спектра $h\nu=0,5-1,0$ эВ, T_{\max} достигает 90-97%. При скоростях конденсации 2,5 нм/с T_{\max} а T_{\min} интерференция уменьшается (кривая 3) и полученных при сравнительно больших скоростях 2,53 нм/с интерференция наблюдается только в области 2–2,5 мкм, а T в этой области достигал 20%. Отсюда следует, что с увеличением скорости конденсации коэффициент пропускания уменьшается.

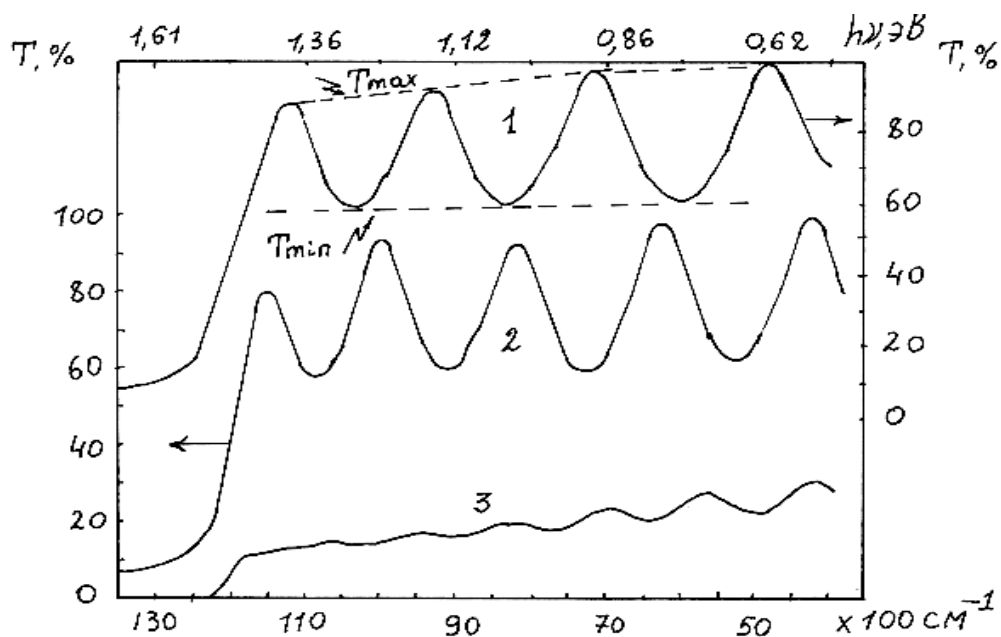


Рисунок 3.3 – Коэффициент пропускания для АФН-пленок CdTe:Ag, полученных при разных скоростях конденсации в нм / с:

1– 0,2; 2 – 1,70; 3 – 2,5

Далее использованием метода огибающих функций максимумов интерференции, мы определяли показатель преломления, толщину пленок d , значения которых приведены в табл.3.1 и является существенно меньшими, чем

в монокристаллах $n=2,7$ при $\lambda=1,5$ мкм, что аналогично данным, полученным для пленок CdSe.

Таблица 3.1 – Показатели преломления и толщины пленок

Номер образца	ν , нм/с	d, мкм	n	λ , мкм
15	0,2	0,9	2,64	1,05
8	1,70	1,60	2,62	1,5
10	2,53	2,19	2,68	1,6

Кроме того, толщина пленок определялась с помощью микроинтерферометров МИИ-4 и МИИ-5 посредством смещения интерференционных полос, возникающих при отражении света от поверхности слоя и подложки. Затем, зная значения ν , d, мы определили коэффициент поглощения K с помощью формулы и

$$K = \frac{\ln \alpha}{d} ;$$

$$d = \frac{C_1 [1 - (T_{\max} / T_{\min})]^{1/2}}{C_2 [1 + (T_{\max} / T_{\min})]^{1/2}}$$

Где

(3.8)

Спектры фотосигнала представлены на рис.3.4. Как видно, на спектрах поглощения света на этих пленках имеется явно выраженная примесная полоса поглощения. В области 1,45-1,5 эВ поглощение света почти совпадает с данными для монокристаллов (имеется длинноволновый сдвиг около 0,02 эВ) и соответствует собственной полосе поглощения. Длинноволновый сдвиг может быть объяснен внутренним напряжением в $2,5 \cdot 10^8$ Па, если использовать $\frac{dE}{dP} = 7,9 \cdot 10^{-6}$ эВ. См²/кг. Далее имеется одна более явно выраженная полоса с красной границей около 1,3 эВ и другая, не поддающаяся надежной расшифровке, в которой коэффициент поглощения уменьшается от порядка 10^3 до 10^{-2} см⁻¹ в области 0,7-1,3 эВ (рис.3.4). Обе эти полосы связаны с поглощением света глубокими центрами.

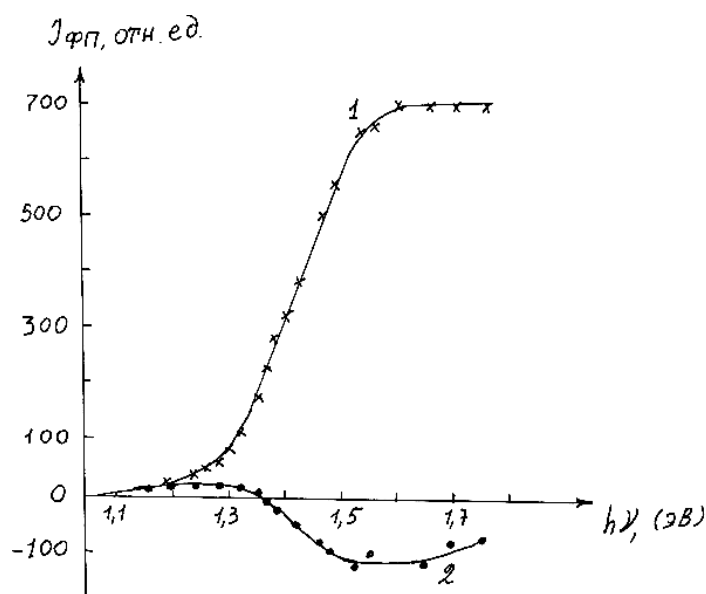


Рисунок 3.4 – Спектры фотосигнала АФН-пленок CdTe:Ag при фронтальном освещении

3.3 Изготовление АФН-приемника

Корпус АФН-приемника, таких как фоторезистора из собственных полупроводников, фотодиоды, фототранзисторы, работающие при температурной среды, должны выполнять две функции. Первой функцией является герметизация АФН-пленки т.е. светочувствительного элемента в нейтральной среде для защиты от атмосферных влияний и предотвращения нестабильности параметров прибора. Второй функцией является обеспечение возможности освещения соответствующей области чувствительного элемента. Следовательно, корпус АФН-приемника должен быть не только герметичным, но и пропускать излучения с длинами волн, лежащими в области спектральной характеристики прибора.

На основе этого первом типом корпуса для АФН-приемника является цельностеклянный корпус. Стекло является издавна достаточно широко применяется для фотоприемников, например для фототранзисторов серии ФТ-3Г, так как они являются наиболее герметичными.

При этом технология их проста, что обеспечивает низкую стоимость изготовления. Спектральная характеристика пропускания свинцового стекла приведена на рисунке 3.5 [14]. Как видно, оно пропускает излучение с длинами

волн до 2,8 мкм. С этой точки зрения стеклянные корпуса могут быть рационально применены для АФН-приемников.

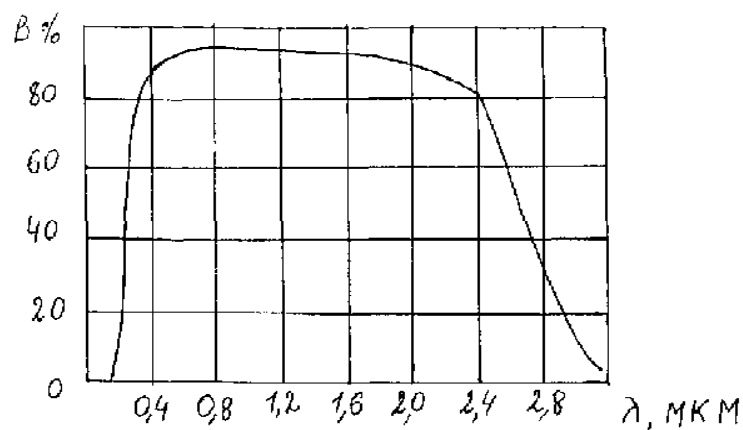


Рисунок 3.5 – Спектр пропускания свинцового стекла

Рассмотрим технологию стеклянного корпуса для АФН-приемника который представлены на рис. 3.6. Он состоит из трех частей - крышка стеклянная, выводы со стеклянными бусами и чувствительный элемент.

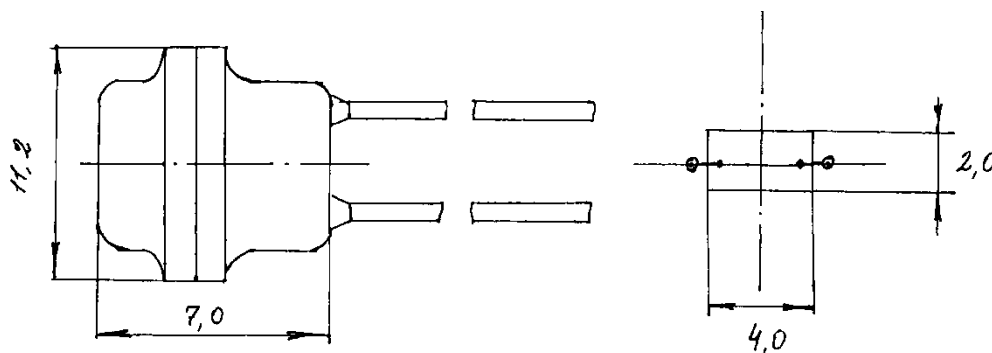


Рисунок 3.6 – Внешний вид АФН-приемника

Стекло с диаметром 8 мм устанавливаются герметично на крышку диаметром 11,2 мм. Вторая часть корпуса изготавливается следующим образом. На покрытие медную проволоку из сплава FeNiCu диаметром 0,25 мм, выгнутую в виде буквы Г и покрытую бурой, одевают два кусочка трубки и свинцового стекла размером и на расстоянии, как на рисунке 3.6. Затем на газокислородной горелки их расплавляют с целью образования двух бус, через которые проходят плотные выводы.

После изготовления бус проволока очищается от буры путем кипячения в лимонной кислоте или погружением в 25%ный водный раствор азотной кислоты. Очищенные выводы для защиты от коррозии покрываются золотом или никелируются электролитическим способом. После обрезания до нужных размеров (42 мм) вывод готов для монтажа чувствительного элемента. Омические контакты АФН- приемника получаются сплав олова с примесью 1% сурьмы или 1% галлия . После создания металлических контактов на наружных областях пленок она монтируется в оправке. Далее корпус герметизируется пайкой, крышки стеклянная устанавливается сверху в сухом воздухе. По этому методу изготовлены автономный приемника оптического излучения «АФ-4М» [9].

Основные технические данные

Чувствительность при $J_v=1\text{лк}$, В _____ 5
 Внутреннее сопротивление, Ом _____ 10^{14}
 Быстродействие, с _____ 1
 Долговечность, ч не месте _____ 10000
 Габариты, мм _____ 11,2x11,ix49
 Масса, в граммах не более _____ 2,0

На базе описанных выше пленок из соединений CdTe, CdTe:Ag были изготовлены АФН приемники. В качестве светочувствительного элемента автономного приемника оптического элемента нами использованы пленки, размером 4x2мм.

Кривые показывают хорошее спектральное согласование оптоэлектронных пар CdTe:Ag и АЛ-108А и CdTe:Ag и АЛ-307М (рис.3.7).

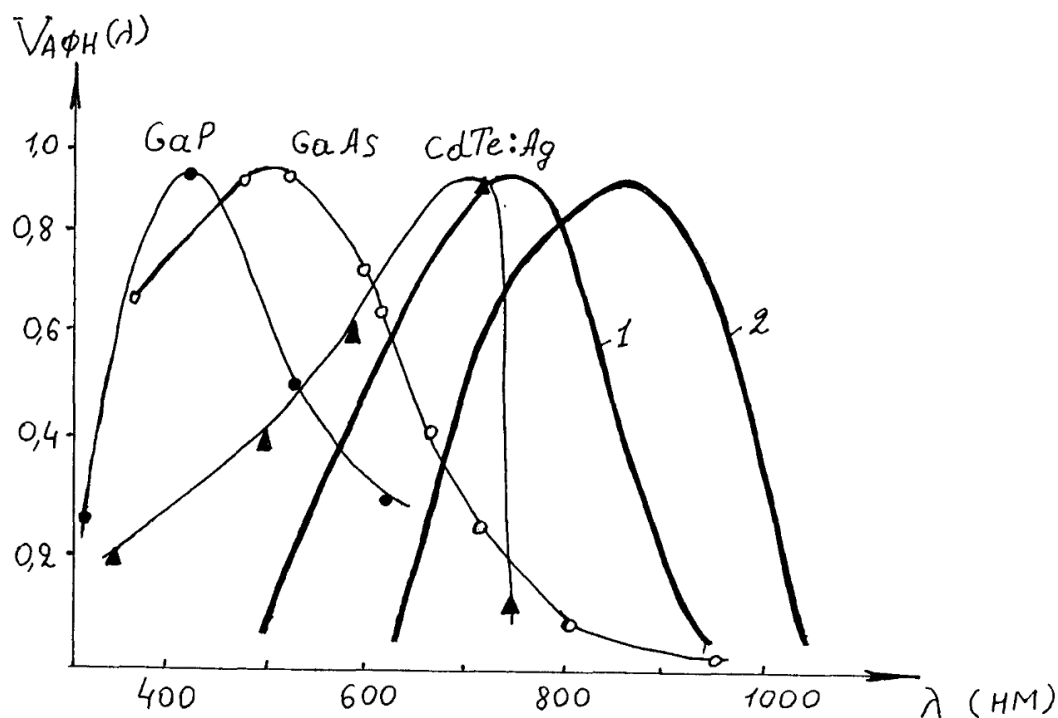


Рисунок 3.7 – Спектры $V_{АФН}(\lambda)$ АФН-пленки GaP, GaAs, CdTe:Ag и спектры испускания СИД АЛ-108А (1) и АЛ 307М (2)

3.4 Многоволновые устройства контроля оптических параметров веществ на основе СИД и АФН-приемников

Анализ методов [5-9] и средств контроля оптических параметров веществ показывает, что наиболее перспективным является разработка многоволновых оптоэлектронных методов, позволяющих исключить влияние не информативных параметров на результаты измерения.

К недостаткам оптоэлектронных одноволновых методов контроля оптических параметров жидких сред относится сравнительно высокая погрешность измерения из-за влияния на результат контроля таких параметров, как температура, сложный химический поверхности и т.п.

Реализация этих методов на светоизлучающих диодах и АФН-приемниках позволяет создать миниатюрные, надежные устройства с малыми энергопотреблениями, вписывающиеся в технологический процессе анализов жидких сред [4,5,6,9].

Для решения этой задачи нами исследовано взаимодействие оптического излучения различных длин волн с исследуемыми жидкостями, для выявления избирательных полос поглощения.

По результатам исследования физико-химического состава и с контрольных характеристик нефтепродуктов для контроля цвета определены длины волны излучения $\lambda_1 = 560_{\text{нм}}$ и $\lambda_2 = 680_{\text{нм}}$.

Для контроля концентрации и влажности различных жидкостей определены длины волн излучения для опорного и измерительного излучения $\lambda_1 = 0,84_{\text{мкм}}$ и $\lambda_2 = 0,97_{\text{мкм}}$.

В таблице 3.2 приведены структурные схемы основных узлов многоволновых устройств на основе светоизлучающих диодов и АФН-приемника [52].

При использовании СИД в качестве анализирующего источника излучения в двух волновых оптоэлектронных преобразователях можно различить три режима питания: [7-8] (рис.3.8)

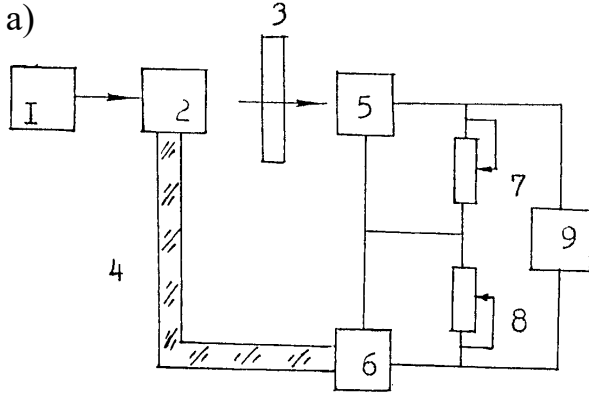
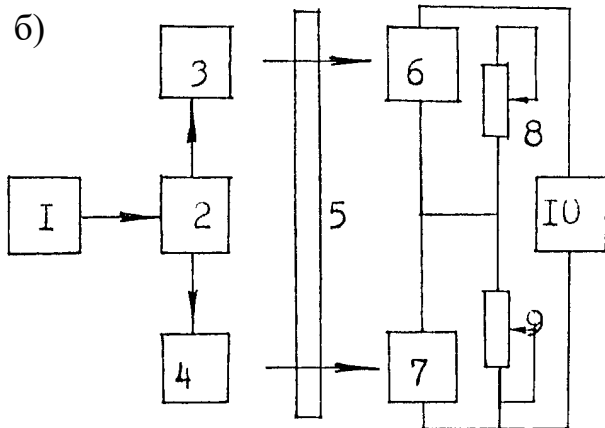
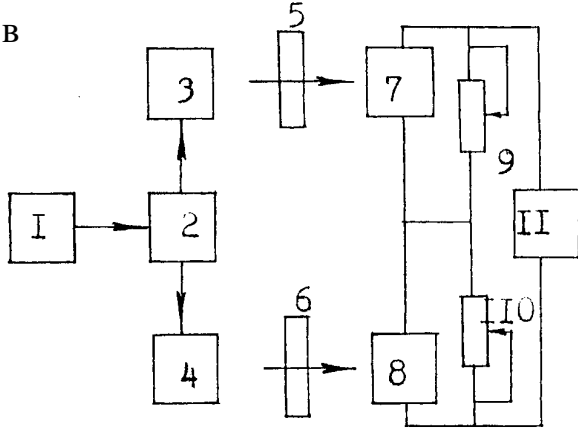
Режим питания постоянным током;

Импульсный режим питания;

Функциональный режим питания;

Импульсный режим, являясь, частным случаем функционального режима питания, имеет ряд преимуществ перед режимом питания постоянным током. Подбирая необходимую скважность импульсов тока, протекающего через СИД, можно обеспечить достаточно высокую мощность излучения с одновременным упрощением процесса усиления и обработки фотоэлектрического сигнала.

Таблица 3.2 – Структурные схемы основных узлов многоволновых устройств

Структурная схема	Основные узлы
<p>a)</p> 	<p>1 - блок импульсного питания, 2-СИД, 3- контролируемый жидкость, 4-световод, 5,6-идентичные АФН приемники, 7, 8- переменные резисторы, 9 - регистрирующее устройство.</p>
<p>б)</p> 	<p>1 - блок импульсного питания, 2-триггер, 3 - измерительный СИД, 4-опорный СИД, 5-контролируемый жидкость, 6, 7- идентичные АФН приемники, 8,9- переменные резисторы, 10- регистрирующее устройство.</p>
<p>в)</p> 	<p>1 - блок импульсного питания, 2-триггер, 3,4-идентичные СИД, 5-контролируемый жидкость, 6-эталонный раствор, 7,8- идентичные АФН приемники, 9,10- переменные резисторы, 11- регистрирующее устройство.</p>

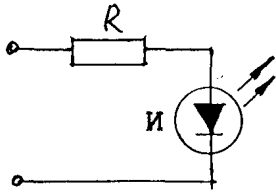

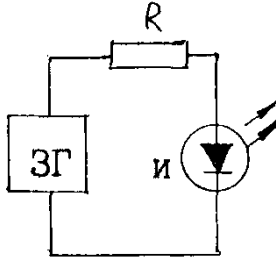
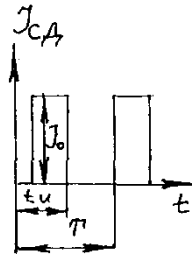
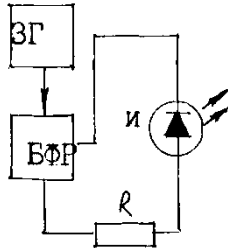
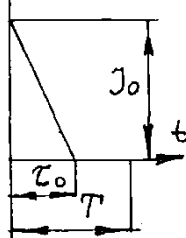
№	Режим питания	Схема включения	Временные диаграммы	Математическое представление сигнала
1	Постоянный ток			$\Phi(t) = kI_0 = \Phi_0$
2	Импульсный			$\Phi(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0 \\ \Phi_0 & \text{при } 0 \leq t \leq t_u \\ 0 & \text{при } t \geq t_u \end{cases}$
3	Функциональный			$\Phi(t) = \Phi_0 e^{-\frac{t}{\tau_0}}$

Рисунок 3.8 – Режимы питания СИД
ЗГ – задающий генератор; БФР – блок функциональной развертки

3.5 Перспективы создания оптоэлектронных приборов для контроля параметров веществ и материалов на основе АФН-приемника

Одним из основных этапов при разработке оптоэлектронных преобразователей и измерительных устройств является выбор фотоприемника.

Развитие пленочной электроники, т.е. разработки АФН-приемников, проводило новый раздел оптоэлектроники, основанную на светоизлучающих диодах и автономного приемника оптического излучения (АПОИ).

С помощью оптоэлектронного метода и устройства с применением АПОИ успешно решаются и могут быть решены многие задачи в области измерительной техники [3-6 и 11-15]. На рис.3.9 приведена стабилизированная схема, являющаяся попыткой выявить возможности применения АПОИ в оптоэлектронике как в настоящее время, так и ближайшей перспективе.



Рисунок 3.9 – Стабилизированная схема возможности применения АПОИ в оптоэлектронике

В оптоэлектронных устройствах на основе излучателя и приемника АФН-приемник используется как первичный преобразователь, преобразующий оптический сигнал в электрический. Получаемый при этом электрический сигнал в виде напряжения регистрируется или поступает в электронные схемы, осуществляющие его переработку и выделение из него параметра, несущего информацию об измеряемой величине. При этом, преобразованный сигнал поступает на измерительный прибор, градуируемый в значениях измеряемой величины X .

Если рассмотреть математическую модель АФН-приемника, то он является функцией многих переменных: Φ -светового потока, L -спектрального состава оптического излучения; температуры T и влажности B :

$$u_{\Phi} = f(\Phi, T, L, B) \quad (3.9)$$

Если рассматривать зависимость фотонапряжения на выходе АФН-приемника от времени, выражению (3.9) можно придать вид:

$$u_{\text{тм}} = S_0(B, T) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{a_k(x_1, x_2, \dots, x_m)}{\sqrt{1 + (k\omega\tau)^2}} \sin k\omega\tau \sum_{n=0}^{\infty} S_{\lambda_n} \Phi_{\lambda_n}(x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (3.10)$$

где a_k - относительная амплитуда k -й гармонической составляющей светового

потока на входе АФН - приемника; $\omega = \frac{2\pi}{T_0}$ - круговая частота (T_0 - периода повторения входного сигнала); τ - постоянная времени АФН - приемника; S_0 - абсолютная чувствительность АФН - приемника к излучению с длиной волны λ_0 ; S_{λ_n} - относительная чувствительность фотоприемника к излучению на длине волны λ_n (отношение к S_0); Φ_{λ_n} - световой поток с длиной волны λ_n , поступающий на фотоприемник; x_1, x_2, \dots, x_m - всевозможные параметры, влияющие на величину светового потока и на его гармонический $\sum a_k$ состав.

В целом, оптоэлектронные устройства с применением АФН-приемников можно использовать в контрольно-измерительной технике в качестве параметрического измерительного преобразователя неэлектрических величин,

такие как плотность, влажность, координатно-движущиеся объекты, цвета, жирности молока и молочных продуктов, концентрация, уровень и т.д.

Следует отметить, что применение, АФН-приемников в качестве АПОИ открывает широкие возможности в разработке миниатюрных измерительных устройств для контроля различных физических параметров.

3.6 Выводы по разделу

Результаты настоящей работы показали, что АФН-эффект представляет теоретический и практический интерес при создании первичных преобразователей приемников оптического излучения и очерчен круг вопросов, требующих своего дальнейшего развития и объяснения.

Результаты полученные для АФН-пленок типа CdTe характерны тем, что величина фотонапряжения зависит от толщины пленок. Причем с увеличением толщины пленки АФН-уменьшается. Оптимальной толщиной пленки является $\sim 1 \mu\text{м}$, при которой АФН достигает максимального значения.

Для пленок CdTe, CdTe:Ag, полученных при различных скоростях конденсации и разной толщины, на длинноволновом крае спектров аномального фотонапряжения $V_{\text{АФН}}(h\nu)$ и тока короткого замыкания $I_{\text{кз}}(h\nu)$ четко выявляются их структурные особенности.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Исследованы фотоэлектрические свойства АФН-пленок в поликристаллических полупроводниковых пленках CdTe, CdTe:Ag используемых в качестве приемника оптического излучения.

2. На основе релаксационных свойств АФН-пленках CdTe, CdTe:Ag показано, что при исследовании АФН-эффекта наблюдается образцы обладающие инверсией фототока во времени, и этот характер объяснен совместным действием микро р-п и микро n-р переходов, лежащих на различной глубине и обладающие разными характеристиками.

3. Установлено, что при нанесении покрытия из серебра на противоположную сторону подложки до получения АФН-пленок, (при температуре 250-300 °С, в вакууме 10^{-3} – 10^{-4} мм.рт.ст., время напыления составляет 30-40 сек) в пленочных структурах типа CdTe АФН-эффект увеличивается до 20-25%.

4. Показано, что контролируемое введение серебра в АФН-пленку приводит к возможности управлять сдвигом спектра в сторону ИК диапазона.

5. Показано, что износостойкость серебряных пленок, полученных при одновременном облучении аргоном с различными параметрами облучения и из сравнительных данных для стеклянной подложки, видно что при одновременной бомбардировке и напылении ионами аргона (при энергии $E=300$ эВ) и серебра (температура подложки $500-600$ °С, плотность тока $0,4-0,6$ мкА·см⁻², время облучения и напыление 25-30 мин) происходит существенное увеличение износостойкости покрытий.

6. Обоснованы перспективы создания оптоэлектронных приборов для контроля технологических параметров веществ и материалов на основе СИД и АФН-приемника.

4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

4.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Одним из основных этапов при разработке оптоэлектронных преобразователей и измерительных устройств является выбор фотоприемника.

Развитие пленочной электроники, т. е. разработки АФН-приемников, породило новый раздел оптоэлектроники, основанный на светоизлучающих диодах и автономных приемниках оптического излучения (АПОИ).

С помощью оптоэлектронного метода и устройств с применением АПОИ могут быть решены и успешно решаются многие задачи в области измерительной техники. На рис. приведена систематизированная схема, являющаяся попыткой выявить возможности применения АПОИ в оптоэлектронике как в настоящее время, так и ближайшей перспективе.

Таблица 4.1 – Карта сегментирования АФН в различных областях электроники

		Область применения			
		Метрология	Электроника	Военная промышленность	Автоматизация процессов
Размер компании	Крупные				
	Средние				
	Мелкие				



Фирма А



Фирма Б



Фирма В

4.1.1 SWOT-анализ

SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. Матрица показывает сильные и слабые стороны проекта, возможности и угрозы для разработки.

Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде. Матрица SWOT представлена в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – SWOT-анализ

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Экологическая безопасность С2. Наличие прототипа научной разработки С3. Успешная конкуренция и высокий спрос продукта на международном уровне С4. Модернизация прибора в рамках проекта не вызовет существенного изменения в производстве С5. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии.	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Недостаточный уровень точности текущего производства не обеспечивает должного уровня повторяемости продукции Сл2. Большой срок от момента согласования модернизированной конструкции до получения отпаянного прототипа Сл3. Большой срок поставок материалов и комплектующих, используемых при проведении научного исследования Сл4. Высокая стоимость измерительного оборудования, необходимого для проведения исследований
Возможности: В1. Появление дополнительного спроса на новый продукт В2. Повышение производительности в импульсных технологиях В3. Возможность одновременной коммутации нескольких приборов В4. Получение новых фундаментальных знаний в исследуемой области В5. Применение исследуемых приборов в перспективных экспериментальных установках	Соотношение выявленных сильных сторон и возможностей научно-исследовательского проекта однозначно свидетельствуют о высоком рыночном потенциале рассматриваемой продукции. Улучшенные характеристики тиратрона создадут не только дополнительный спрос в уже существующих областях импульсной электротехники, но и позволят использовать их в новых областях отрасли.	Выявленные слабые стороны научно-исследовательского проекта по большей части относятся к уровню производства рассматриваемых приборов и к обеспечению условия для проведения исследований в этой области. В случае, если выявленные слабые стороны не будут устранены, будет невозможно одновременное использование нескольких приборов, а также могут происходить прерывания в проведении исследований.

Угрозы: У1. Снижение доли рынка газоразрядных коммутаторов в пользу твердотельных У2. Монополия на внутреннем рынке У3. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства У4. Введения дополнительных государственных требований к сертификации продукции У5. Ограничения на экспорт продукции	Несмотря на сильные стороны проекта, потенциально-существующие угрозы могут не только снизить спрос на АФН, но и прервать проводимые в этой области исследования, а также нанести вред отрасли в целом. Однако, не стоит ожидать полного вытеснения их с рынка, благодаря уникальным характеристикам.	Хотя выявленные угрозы и слабые стороны проекта прямо не соотносятся друг с другом, следует ожидать снижения спроса на тиратроны в том случае, если не будет обеспечиваться достаточная точность их производства.
--	---	---

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или несоответствие должны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений.

Соотношения параметров представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта						
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	B1	-	-	-	0	+
	B2	-	-	-	+	+
	B3	-	+	+	-	0
	B4	-	+	+	+	-
	B5					

Слабые стороны проекта						
Возможности проекта		СЛ1	СЛ2	СЛ3	СЛ4	СЛ5
	B1	-	-	+	0	-
	B2	-	-	-	-	+
	B3	-	-	-	-	+
	B4	-	+	+	+	-
	B5	0	-	0	-	+

Сильные стороны проекта						
Угрозы проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	У1	0	+	+	+	-
	У2	-	+	+	+	-
	У3	-	0	-	+	0
	У4	-	-	-	-	-
	У5	-	-	0	+	+

Слабые стороны проекта						
Угрозы проекта		СЛ1	СЛ2	СЛ3	СЛ4	СЛ5
	У1	+	-	+	+	-
	У2	+	-	+	+	0
	У3	+	-	+	+	-
	У4	+	-	-	-	-
	У5	0	+	+	+	-

4.1.2 Оценка готовности проекта к коммерциализации

На какой бы стадии жизненного цикла не находилась научная разработка полезно оценить степень ее готовности к коммерциализации и выяснить уровень собственных знаний для ее проведения (или завершения). Для этого необходимо заполнить специальную форму, содержащую показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта. Перечень вопросов приведен в табл. 4.4.

Таблица 4.4 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1.	Определен имеющийся научно-технический задел	4	4
2.	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	3	5
3.	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	3	4
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	4	3
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	4	2
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	4	2
7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	3	2
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	2	3

9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	3	4
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	5	4
11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	3	4
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	2	3
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	3	3
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	2	2
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	5	5
	ИТОГО БАЛЛОВ	50	40

Итоговые значения проработанности научного проекта и знания у разработчика лежат в диапазоне от 40 до 50, что говорит о средней перспективности проекта. Многие аспекты вывода продукта на рынок не были учтены, а также проявляется недостаток знаний. Следовательно, требуется дополнительные затраты на наём или консультации у соответствующих специалистов.

4.1.3 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

Для получения АФН-пленок из соединений CdSe, CdTe, CdTe:Cd нами использован метод термического испарения в вакууме. Вакуумная установка собрана на основе механического форвакуумного насоса типа РВН-4 и паромасленного диффузионного насоса типа Н-01, которые обеспечивают давление порядка 10^{-4} мм рт. ст. В качестве испарителей использованы тигли из окиси алюминия или бериллия [3].

Температура испарения полупроводника достигалась регулированием тока. Подложки нагревались с помощью печки, конструкция которой дает возможность изменять температуру подложки до 600°C. Температура на подложке и испарителя контролировалась хромель-алюмелиевыми

термопарами, закрепленными непосредственно на них. В качестве подложек использовали стекло и кварц с металлическими контактами.

4.2 Инициация проекта

В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат научного проекта.

4.2.1 Цели и результаты проекта

Перед определением целей необходимо перечислить заинтересованные стороны проекта. Информация по заинтересованным сторонам представлена в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидание заинтересованных сторон
Государство	Финансовая выгода, простота в использовании, экологическая и эксплуатационная безопасность.
Частные предприятия	Малые габариты, более длительный срок службы без выхода в ремонт по сравнению с аналогичными технологиями, дешевле своих аналогов.
Студент	Выполненная диссертация
Научный руководитель	Конкурентные научные разработки, совместные публикации и т.д.

Таблица 4.6 – Цели и результат проекта

Цели проекта:	<ul style="list-style-type: none"> • анализ принципов работы существующих ПОИ; • выбор оптимального технологического режима изготовления эффективных АФН-пленок из соединений CdTe, CdTe:Ag и изучение механизма возникновения АФН-эффекта; • изготовление автономного ПОИ на основе АФН-пленок для регистрации рентгеновского и ультрафиолетового излучения; <p>обоснование перспективы создания оптоэлектронных</p>
---------------	--

	приборов для контроля толщины рулонных материалов на основе АФН-приемника.
Ожидаемые результаты проекта:	Успешное внедрение разработки в АФН-приемника.
Критерии приемки результата проекта:	Успешное тестирование функционала в соответствии с функциональным требованием.
Требования к результату проекта:	<ul style="list-style-type: none"> АФН-приемника для оптоэлектронной информационно – измерительной системы. Разработанный функционал полностью соответствует проектным решениям.

4.2.2 Ограничения и допущения проекта

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а также «границы проекта» - параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта. Эту информацию представить в табличной форме (табл. 4.7).

Таблице 4.7 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения
1.2.3.1 Бюджет проекта	170 000 рублей
1.2.3.1.1 Источник финансирования	НИТПУ
1.2.3.2 Сроки проекта	01.01.2018 – 31.05.2019
1.2.3.2.1 Фактическая дата утверждения плана управления проектом	12.12.2018
1.2.3.2.2 Плановая дата завершения проекта	31.05.2019

4.3 Планирование управления научно-техническим проектом

4.3.1 Иерархическая структура работ проекта

Планирование состоит из подпроцессов, совершаемых для точных действий которые необходимо совершить для достижения конкретной цели.

План проекта включает в себя последовательность этапов:

- Последовательность структурных работ проекта;
- Основные события проекта;

- Основной план работ;

Последовательность структурных работ проекта- поэтапное описание действий которые нужно совершить для достижения конечной цели. На рисунке 4.1 представлено последовательность структурных работ для написания ВКР.



Рисунок.4.1-Последовательность структурных работ проекта















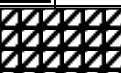
В данной работе применена последовательность представленная на рисунке №2. Данную последовательность действий было решено принять как основную по причине ее наибольшей практичности для написания ВКР, так как она подходит для успешной сдачи отчетов в организацию (ТПУ).

4.3.2 План проекта

Диаграмма Ганта – это тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

График строится в виде табл. 5.8. с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени выполнения научного проекта.

Таблица 4.8 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

Код работ ы (из ИСР)	Вид работ	Исполни тели	Т _к , ч.	Продолжительность выполнения работ																	
				Янв.			Февр.			Март			Апр.			Май.			Ию нь		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1		
1	Выбор направления исследования	Р, С	5																		
2	Описание требований	Р	10																		
3	Патентный поиск	С	10																		
4	Составление технического задания	Р	10																		
5	Изучение литературы	С	40																		
6	Проектирование модуля по сбору данных	С	20																		
7	Проектирование АФН	С	20																		
8	Проектирование интерфейса для АФН	С	20																		
9	Сбор данных	С	40																		
10	Разработка модуля	С	80																		
11	Разработка интерфейса	С	40																		
12	Тестирование модуля	С	20																		
13	Тестирование АФН	С	20																		
14	Написание документации	С	50																		
15	Проверка работы	Р	20																		



– Руководитель(Р)



– Студент (С)

4.3.3. Бюджет научного исследования

В нем впервые предложено применение АФН-приемника для оптоэлектронной информационно-измерительной системы. Изложена методика и приведены результаты экспериментальных исследований возможности

применения оптрона открытого канала для контроля физических и химических веществ. Данная идея проверена, результаты ее применения продемонстрированы, эффективность этого предложения подтверждена экспериментально.

Основная заработная плата

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы (размер определяется Положением об оплате труда). Расчет основной заработной платы сводится в табл. 4.9.

Таблица 4.9 – Расчет основной заработной платы

№ п/п	Наименование этапов	Исполнители по категориям	Трудоемкость, чел.-дн.	Заработная плата, приходящаяся на один чел.-дн., руб	Всего заработная плата по тарифу (окладам), руб.
1		Руководитель		17000	17000
2		Магистр		2650	2650
Итого:					19650

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп} \quad (1)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата;

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата $Z_{осн}$ руководителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб} \quad (2)$$

где $T_{раб}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб.дн. (таблица 14);

$Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Значит, для руководителя:

$$З_{осн} = 17000 * 1,3 = 22100 \text{ рублей}$$

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{дн} = (З_{м} \cdot М) / F_{д} \quad (3)$$

где $З_{м}$ – месячный должностной оклад работника, руб (в качестве месячного оклада магистра выступает стипендия, которая составляет 2650 руб);

$М$ – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 45 раб. дней $М = 10,4$ месяца, 6 - дневная неделя;

$F_{д}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала (в рабочих днях) (табл.14). Тогда,

Для руководителя:

$$З_{дн} = \frac{22100 * 10,4}{254} = 904,8 \text{ рублей}$$

Для дипломника:

$$З_{дн} = \frac{2650 * 10,4}{217} = 127 \text{ рублей}$$

Баланс рабочего времени представлен в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Магистр
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	52	82
- праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
- отпуск	45	52
- невыходы по болезни	—	—
Действительный годовой фонд рабочего времени	254	217

Таблица 4.11 – Результаты расчета основной заработной платы

Исполнители	$З_{б},$ руб.	k_p	$З_{м},$ руб	$З_{дн},$ руб.	$T_p,$ раб. дн.	$З_{осн},$ руб.
Руководитель	17000	1.3	22100	904,8	48	22100
Магистр	2650		2650	127	76	2650
Итого по статье $З_{осн}$:						24750

Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала

Дополнительная заработная плата включает оплату за непроработанное время (очередной и учебный отпуск, выполнение государственных обязанностей, выплата вознаграждений за выслугу лет и т.п.) и рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} * З_{\text{осн}} \quad (4)$$

где $З_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата, руб.;

$k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной зарплаты ($k_{\text{доп}}=0,1$);

$З_{\text{осн}}$ – основная заработная плата, руб.

Для руководителя:

$$З_{\text{доп}} = 22100 * 0,1 = 2210 \text{ рублей}$$

В таблице 4.12 приведен расчёт основной и дополнительной заработной платы.

Таблица 4.12 – Заработная плата исполнителей ВКР, руб

Заработная плата	Руководитель	Магистр
Основная зарплата	22100	2650
Дополнительная зарплата	2210	–
Зарплата исполнителя	24310	2650
Итого	26960	

Отчисления на социальные нужды

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$С_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} * (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}) = 0,3 * (22100 + 2210) = 7293 \text{ руб.} \quad (5)$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

Накладные расходы

В эту статью относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др. В расчетах эти расходы принимаются в размере 20 - 25 % от суммы основной заработной платы научно-производственного персонала данной научно-технической организации.

4.4 Организационная структура проекта

В практике спользуется несколько базовых вариантов организационных структур: функциональная, проектная, матричная.

Для выбора наиболее подходящей организационной структуры можно использовать табл. 4.13.

Таблица 4.13 – Выбор организационной структуры научного проекта

Критерии выбора	Функциональная	Матричная	Проектная
Степень неопределенности условий реализации проекта	Низкая	Высокая	Высокая
Технология проекта	Стандартная	Сложная	Новая
Сложность проекта	Низкая	Средняя	Высокая
Взаимозависимость между отдельными частями проекта	Низкая	Средняя	Высокая
Критичность фактора времени (обязательства по срокам завершения работ)	Низкая	Средняя	Высокая
Взаимосвязь и взаимозависимость проекта от организаций более высокого уровня	Высокая	Средняя	Низкая

В данном случае выбор лежит к проектной структуре проекта из-за особенностей разработки. Составляющая проекта является модульные системы, работающие в постоянном взаимодействии с другими модулями. Также

основной причиной выбора проектной структуры является то, что технология проекта является новой, и имеются ограниченные сроки реализации.

4.4.1 План управления коммуникациями проекта

План управления коммуникациями отражает требования к коммуникациям со стороны участников проекта. Пример плана управления коммуникациями приведен в табл. 4.14.

Таблица 4.14 – Пример плана управления коммуникациями

№ п/п	Какая информация передается	Кто передает информацию	Кому передается информация	Когда передает информацию
1.	Статус проекта	Руководитель проекта	Представителю заказчика	Ежеквартально (первая декада квартала)
2.	Обмен информацией о текущем состоянии проекта	Исполнитель проекта	Участникам проекта	Еженедельно (пятница)
3.	Документы и информация по проекту	Ответственное лицо по направлению	Руководителю проекта	Не позже сроков графиков и к. точек
4.	О выполнении контрольной точки	Исполнитель проекта	Руководителю проекта	Не позже дня контрольного события по плану управления

4.4.2 Реестр рисков проекта

Идентифицированные риски проекта включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты. Информацию по данному разделу необходимо свести в таблицу (табл. 4.15).

Таблица 4.15 – Реестр рисков

№	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность наступления (1-5)	Влияние риска (1-5)	Уровень риска*	Способы смягчения риска	Условия наступления
1	Потеря актуальности		2	5	средний	Внедрение нового функционала в процессе жизненного цикла	Слишком хаотичное изменение рынка, появление новых инструментов
2	Неточность АФН		4	5	высокий	Модификация	С течением времени АФН теряет свою точность
3	Создание новой технологии защиты электрического оборудования от перегрузки, короткого замыкания и отключения		1	3	Малый	Что и в первом	Признание всех действующих методик устаревшими и не подходящими для дальнейшего применения.

4.5 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

4.5.1 Оценка абсолютной эффективности исследования

Динамические методы оценки инвестиций базируются на применении показателей:

- чистая текущая стоимость (**NPV**);
- срок окупаемости (**DP**);
- внутренняя ставка доходности (**IRR**);
- индекс доходности (**PI**).

Все перечисленные показатели основываются на сопоставлении чистых денежных поступлений от операционной и инвестиционной деятельности, и их приведении к определенному моменту времени. Теоретически чистые денежные поступления можно приводить к любому моменту времени (к будущему либо текущему периоду). Но для практических целей оценку инвестиции удобнее осуществлять на момент принятия решений об инвестировании средств.

4.5.2 Чистая текущая стоимость (NPV)

Данный метод основан на сопоставлении дисконтированных чистых денежных поступлений от операционной и инвестиционной деятельности.

Если инвестиции носят разовый характер, то **NPV** определяется по формуле

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{ЧДП_{опt}}{(1+i)^t} - I_0,$$

где **ЧДП_{опt}** – чистые денежные поступления от операционной деятельности;

I₀ – разовые инвестиции, осуществляемые в нулевом году;

t – номер шага расчета (**t**=0, 1, 2... **n**);

n – горизонт расчета;

i – ставка дисконтирования (желаемый уровень доходности инвестируемых средств).

Чистая текущая стоимость является абсолютным показателем. Условием экономичности инвестиционного проекта по данному показателю является выполнение следующего неравенства: $NPV > 0$.

Чем больше NPV , тем больше влияние инвестиционного проекта на экономический потенциал предприятия, реализующего данный проект, и на экономическую ценность этого предприятия.

Таким образом, инвестиционный проект считается выгодным, если NPV является положительной.

Таблица 4.16 – Расчет чистой текущей стоимости по проекту в целом

№ №	Наименование показателей	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4
11	Выручка от реализации, тыс.руб.	0	99,184	99,184	99,184	99,184
22	Итого приток, тыс.руб.	0	99,184	99,184	99,184	99,184
33	Инвестиционные издержки, тыс.руб.	-152448,5	0	0	0	0
44	Операционные затраты, тыс. руб. С+Ам+ФОТ	0	33,824	33,824	33,824	33,824
55	Налогооблагаемая прибыль		65,360	65,360	65,360	65,360
66	Налоги, тыс. руб Выр-опер=донал.приб*20%	0	13,072	13,072	13,072	13,072
77	Итого отток, тыс.руб. Опер.затр.+налоги	-152448,5	46,896	46,896	46,896	46,896
88	Чистый денежный поток, тыс. руб. ЧДП=Пчист+Ам Пчист=Пдонал.-налог	-152448,5	52,290	52,290	52,290	52,290
99	Коэффициент дисконтирования (приведения при $i=20\%$)	1,0	0,833	0,694	0,578	0,482
110	Дисконтированный чистый денежный поток, тыс.руб. (с8*с9)	-152448,5	43,557	36,289	30,223	25,203
111	То же нарастающим итогом, тыс.руб. ($NPV=58,976$ тыс.руб.)	-152448,5	-32,739	3,550	33,773	58,976

Таким образом, чистая текущая стоимость по проекту в целом составляет 58,976 тыс. рублей, что позволяет его эффективности.

Дисконтированный срок окупаемости

Как отмечалось ранее, одним из недостатков показателя простого срока окупаемости является игнорирование в процессе его расчета разной ценности денег во времени.

Этот недостаток устраняется путем определения дисконтированного срока окупаемости.

Рассчитывается данный показатель примерно по той же методике, что и простой срок окупаемости, с той лишь разницей, что последний не учитывает фактор времени.

Наиболее приемлемым методом установления дисконтированного срока окупаемости является расчет кумулятивного (нарастающим итогом) денежного потока (см. табл. 4.17.).

Таблица 4.17 – Дисконтированный срок окупаемости

№	Наименование показателя	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4
1.	Дисконтированный чистый денежный поток ($i=0,20$)	-152448,5	43,557	36,289	30,223	25,203
2.	То же нарастающим итогом	-152448,5	-32,739	3,550	33,773	58,976
3.	Дисконтированный срок окупаемости	$PP_{дск} = 1 + 32,739/36,289 = 0,92 \text{ года}$				

Внутренняя ставка доходности (IRR)

Для установления показателя чистой текущей стоимости (NPV) необходимо располагать информацией о ставке дисконтирования, определение которой является проблемой, поскольку зависит от оценки экспертов. Поэтому, чтобы уменьшить субъективизм в оценке эффективности инвестиций на практике широкое распространение получил метод, основанный на расчете внутренней ставки доходности (IRR).

Между чистой текущей стоимостью (NPV) и ставкой дисконтирования (i) существует обратная зависимость.

Таблица 4.18 – Зависимость **NPV** от ставки дисконтирования

No	Наименование показателя	0	1	2	3	4	
1	Чистые денежные потоки	-152448,5	99,184	99,184	99,184	99,184	
2	коэффициент дисконтирования						
	i=0,1	1	0,909	0,826	0,751	0,683	
	i=0,2	1	0,833	0,694	0,578	0,482	
	i=0,3	1	0,769	0,592	0,455	0,35	
	i=0,4	1	0,714	0,51	0,364	0,26	
	i=0,5	1	0,667	0,444	0,295	0,198	
	i=0,6	1	0,625	0,39	0,244	0,095	
	i=0,7	1	0,588	0,335	0,203	0,07	
	i=0,8	1	0,556	0,309	0,171	0,095	
	i=0,9	1	0,526	0,277	0,146	0,077	
	i=1	1	0,5	0,25	3:00	0,006	

3	Дисконтированный денежный поток, тыс. руб						
	i=0,1	-152448,5	72,887	66,232	60,218	54,766	177,807
	i=0,2	-152448,5	66,793	55,648	46,346	38,649	131,14
	i=0,3	-152448,5	61,661	47,469	36,484	28,064	97,382
	i=0,4	-152448,5	57,251	40,894	29,187	20,848	71,884
	i=0,5	-152448,5	53,483	35,602	23,654	15,876	52,319
	i=0,6	-152448,5	50,115	31,272	19,565	7,617	32,273
	i=0,7	-152448,5	47,148	26,862	16,277	5,613	19,604
	i=0,8	-152448,5	44,582	24,777	13,711	7,617	14,391
	i=0,9	-152448,5	42,177	22,211	11,707	6,174	5,973
	i=1	-152448,5	40,092	20,046	10,023	0,481	-5,654

Из таблицы и графика следует, что по мере роста ставки дисконтирования чистая текущая стоимость уменьшается, становясь отрицательной. Значение ставки, при которой **NPV** обращается в нуль, носит название «внутренней ставки доходности» или «внутренней нормы прибыли». Из графика получаем, что IRR составляет 0,93.

5 Индекс доходности (рентабельности) инвестиций (**PI**)

6 Индекс доходности показывает, сколько приходится дисконтированных денежных поступлений на рубль инвестиций.

7 Расчет этого показателя осуществляется по формуле

$$8 \quad PI = \sum_{t=1}^n \frac{ЧПД_t}{(1+i)^t} / I_0,$$

9 где I_0 – первоначальные инвестиции.

$$10 \quad PI = \frac{43,557+36,289+30,233+25,203}{126,253} = 1,07$$

11 $PI=1,07>1$, следовательно, проект эффективен при $i=0,2$;

12 $NPV=131,14$ тыс. руб.

13 Социальная эффективность научного проекта учитывает социально-экономические последствия осуществления научного проекта для общества в целом или отдельных категорий населения или групп лиц, в том числе как непосредственные результаты проекта, так и «внешние» результаты в смежных секторах экономики: социальные, экологические и иные внеэкономические эффекты.

Таблица 4.19 – Критерии социальной эффективности

ДО	ПОСЛЕ
Нехватка удобных сервисов по анализу текста	Повышение конкурентоспособности рынка АФН.
Трата времени на скучные, однотипные задачи	С ростом популярности АФН возрастет их качество.
Проведение технического обслуживания по графику ППР	Система позволяет следить за состоянием оборудования, что в свою очередь приводит к обслуживанию не по графику, а по требованию, что может существенно снизить затраты на обслуживание оборудования.
Проведение технического обслуживания вручную	Система на базе виртуальных агентов производит постоянный мониторинг состояниями технологического оборудования, следовательно, проведение ТО в ручную больше не требуется.

4.5.3 Оценка сравнительной эффективности исследования

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу

расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (7)$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (8)$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки;

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i^a, b_i^p – балльная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности приведен в форме таблицы (табл. 4.20).

Таблица 4.20 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии \ ПО	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,1	5	3	4
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,15	5	2	3
3. Помехоустойчивость	0,15	3	3	3
4. Энергосбережение	0,20	4	3	3
5. Надежность	0,25	4	4	4
6. Точность анализа	0,15	4	4	4
ИТОГО	1	25	19	22

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_i^p}{\Phi_{\max}} = \frac{5}{25} = 0.2$$

$$I_{\Phi}^a = \frac{\Phi_i^a}{\Phi_{\max}} = \frac{4}{19} = 0.21$$

$$I_T^p = 5 * 0,1 + 5 * 0,15 + 3 * 0,15 + 4 * 0,2 + 4 * 0,25 + 5 * 0,15 = 3,94$$

$$I_{T1}^a = 3 * 0,1 + 2 * 0,15 + 3 * 0,15 + 3 * 0,2 + 4 * 0,25 + 2 * 0,15 = 3,15$$

$$I_{T2}^a = 4 * 0,1 + 3 * 0,15 + 3 * 0,15 + 3 * 0,2 + 4 * 0,25 + 4 * 0,05 = 3,5$$

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_T^p}{I_{\Phi}^p} = \frac{3.94}{0.2} = 19.7$$

$$I_{\text{финр}}^a = \frac{I_T^a}{I_{\Phi}^a} = \frac{3.15}{0.21} = 15$$

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\Phi}^p}{I_{\Phi}^a} = \frac{0.2}{0.21} = 0.95$$

Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Аналог	Разработка
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0.21	0.2
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3.15	3.94
3	Интегральный показатель эффективности	15	19.7
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	0.95	1,05

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет судить о приемлемости существующего варианта решения поставленной в магистерской диссертации технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

В лабораторию для работ не допускаются: лица не являющиеся сотрудниками лаборатории и лица не имеющие доступа для работ с установками; персонал лаборатории не прошедшие аттестацию по ТБ и ознакомление с техническими и паспортными данными установки; лица не достигшие совершеннолетия не допускаются к работам в лаборатории; лица не имеющие специфическое (техническое) образование по исследованиям и не имеют права находиться в лаборатории посторонние люди без сопровождения ответственного человека. Также администрация лаборатории не имеют права на применение труда в ночное время все лица женского пола и лица мужского пола, не достигшие 18-летнего возраста; к производству сверхурочных работ не допускаются все лица женского пола, а из лиц мужского пола - не достигшие 18-летнего возраста; женщины, имеющие детей в возрасте от трех до 14 лет, мужчины, имеющие детей в возрасте до 14 лет, работники, имеющие детей-инвалидов или инвалидов с детства до достижения ими возраста 18 лет, и работники, осуществляющие уход за больными членами их семей в соответствии с медицинским заключением, не могут привлекаться к сверхурочным работам и направляться в командировки без их согласия; запрещается применение труда женщин на тяжелых работах и на работах с вредными условиями труда, а также требования по (СанПиН 2.2.0.555-96) и (ГОСТ 12.0.004-2015).

Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

Эргономическое проектирование рабочих пространств и рабочих мест производится для конкретных рабочих задач и видов деятельности с учетом антропометрических, биомеханических, психофизиологических и психических возможностей и особенностей работающих людей.

Оно должно создать наилучшие условия для:

– размещения работающего человека с учетом рабочих движений и перемещений в соответствии с требованиями технологического процесса;

- выполнение основных и вспомогательных операций в удобном рабочем положении, соответствующем специфике трудового процесса, и с применением наиболее эффективных приемов труда;
- расположение средств управления в пределах оптимальных границ пространства перемещений человека;
- сохранения оптимального обзора источников визуальной информации при смене рабочей позы и рабочего положения;
- свободного доступа к местам профилактических осмотров, ремонта и наладки, удобства их выполнения;
- рационального размещения оборудования, безопасности рабочих.

Правильное расположение и компоновка рабочего места, обеспечение удобной позы и свободы трудовых движений, использование оборудования, отвечающего требованиям эргономики и инженерной психологии, обеспечивают наиболее эффективный трудовой процесс, уменьшают и предотвращают опасность возникновения профессиональных заболеваний.

Неправильное положение тела на рабочем месте приводит к быстрому возникновению статической усталости, снижению качества и скорости выполняемой работы, а также снижению реакции на опасности.

5.2 Производственная безопасность

5.2.1 Анализ вредных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению

В приведенной ниже таблице были отмечены вредные и опасные факторы при работе с вакуумным оборудованием (табл. 5.1.)

Таблица 5.1 – вредные и опасные факторы при работе с вакуумным оборудованием

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ				Нормативные документы
	Разработ ка	Изготов ление	Эксплуа тация		
1)Отклонение показателя микроклимата в помещении	+	+	+		1. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ ^[3] 2. ГОСТ 12.1.012-90 ССБТ ^[4] 3. ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ ^[6] 4. ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ ^[7] 5. ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ ^[8] 6. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ ^[9] 7. ГОСТ 12.2.003-91 ССБТ ^[10] 8. ГОСТ 12.2.061-81 ССБТ ^[11]
2)Повышенный уровень шума и вибрации	+	+	+		
3)Недостаток освещённости рабочей зоны	+	+	+		
4) Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	+	+	+		9. ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ ^[12] 10. ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ ^[13] 11. СанПиН 2.2.4.548–96 ^[14] 12. ГН 2.2.5.3532–18 ^[15] 13 ГН 2.2.5.2308 – 07 ^[16]

5.2.2 Отклонение показателей микроклимата

Метеорологические условия производственной среды зависят от состояния воздушной среды и характеризуются:

- температурой;
- влажностью и скоростью движения воздуха;

- тепловым излучением нагретых поверхностей оборудования и обрабатываемых материалов и изделий.

Совокупность этих факторов, характерных для данного производственного участка, называется производственным микроклиматом.

Эти параметры воздушной среды определяют теплообмен организма, и оказывают существенное влияние на функциональное состояние различных систем организма, самочувствие, работоспособность и здоровье. Кроме того, нарушение теплообмена (охлаждение или перегрев) усугубляет действие на человека вредных веществ, вибрации и других факторов. Поэтому возникает необходимость нормирования микроклимата и разработки гигиенических требований к мероприятиям, направленным на профилактику перегрева и переохлаждения организма, и сохранение высокого уровня работоспособности и здоровья человека.

Метеорологические условия для рабочей зоны производственных помещений регламентируются санитарными правилами и нормами. В зависимости от характера производственных помещений, времени года, и категории выполняемой работы этот документ устанавливает оптимальные и допустимые микроклиматические условия.

5.2.3 Превышение уровня шума и вибрации

Предельно допустимый уровень (ПДУ) шума- это уровень шума при ежедневной работе не превышающей 40 часов в неделю, который не вызывает отклонений в здоровье человека. Для получения АФН-плёнок и отражающих поверхностей, в лаборатории научно-образовательного центра Сибирского государственного университета геосистем и технологий используется вакуумная установка ВУП-2к.

Даже при соблюдении ПДУ по шуму не исключено нанесение вреда человеческому организму(человек становится раздражительным, нервным, забывчивым, тревожным, ухудшается интеллектуальная деятельность, быстро утомляемым, приобретает гипертоническую болезнь, бессонницу,

неправильный обмен веществ), так как некоторые обладают повышенной чувствительностью к шумовым нагрузкам. Допустимый уровень шума устанавливает ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ, ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ.

Таблица 5.2 – Предельно допустимые уровни шума и эквивалентные уровни шума на рабочих местах для трудовой деятельности

Категория напряженности трудового процесса	Категория тяжести трудового процесса	
	Легкая физическая нагрузка	Средняя физическая нагрузка
Напряженность средней степени	70дб	70дб

В лаборатории главными методами защиты персонала от шума является установка на оборудование металлических кожухов, установка оборудования в отдельные залы и управление ими из другого помещения, установка звукопоглощающих обшивок. Так же в основные методы защиты входит обеспечение каждому сотруднику в лаборатории персональных средств индивидуальной защиты(СИЗ): беруши и наушники.

Воздействие производственной вибрации на человека вызывает изменения как физиологического, так и функционального состояния организма человека. Изменения в функциональном состоянии организма проявляются в повышении утомляемости, увеличении времени двигательной и зрительной реакции, нарушении вестибулярных реакций и координации движений. Все это ведет к снижению производительности труда. Изменения в физиологическом состоянии организма — в развитии нервных заболеваний, нарушении функций сердечно-сосудистой системы, нарушении функций опорно-двигательного аппарата, поражении мышечных тканей и суставов, нарушении функций органов внутренней секреции. Все это приводит к возникновению вибрационной болезни.

Средства защиты от вибрации (ГОСТ 12.1.012-90 ССБТ), различных патологий вплоть до профессиональной вибрационной болезни. СИЗ рук оператора подразделяют на: рукавицы; перчатки; вкладыши; прокладки. СИЗ

ног оператора подразделяют на: обувь; подметки; наколенники. СИЗ тела оператора по форме исполнения подразделяют: нагрудники; пояса, специальные костюмы.

5.2.4 Недостаток освещенности рабочей зоны

Значение хорошей освещенности для человеческого отдыха или работы трудно переоценить. Правильное рассчитанное и подобранное освещение очень сильно влияет на трудовую деятельность работника, обеспечивая высокий уровень работоспособности и психического состояния. Не правильно подобранное освещение создает тени на рабочем месте, формы объектов могут искажаться, в итоге зрение напрягается, появляется усталость и падает производительность труда. Требования к освещенности производственных помещений представлены в табл.5.3.(СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03).

Таблица 5.3 – Требования к освещенности рабочего помещения

Помещение	Нормирование поверхности (Г-горизонтальная, В-вертикальная), высота поверхности над полом, м	Естественное освещение		Совмещенное освещение		Искусственное освещение		
		КЕО e_n , %		КЕО e_n , %		Освещенность, люмен		
		При освещении вверху и комбинированном	Освещение с боку	Освещение сверху или комбинированное	Освещение с боку	При комбинированном освещении		При общем освещении
						итого	от общего	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Конструкторские и проектные организации, научно-исследовательские учреждения								
Лаборатории научно-технические отделы	Г - 0,8	3,5	1,2	2,1	0,7	500	300	-

Исходя из СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03 в лаборатории где происходят электротехнические исследования при нахождении людей в помещении с комбинированным освещением, яркость света должна быть не ниже 500 люмен.

Вывод:

В лаборатории где проводились исследования, освещенности достаточно. На всю стену вставлено окно, через которое проникает дневной свет, кроме этого установлены лампы люминесцентные Philips 18Вт G13. Работать и проводить исследования в таком помещении комфортно и приятно, так как столы и установка расположены таким образом, что свет попадает в любые необходимые для человеческого глаза зоны.

5.2.5 Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека

Насыщенность современных лабораторий электрооборудованием чрезвычайно велика. По степени электробезопасности помещения лаборатории относятся к категории помещений без повышенной опасности. Для этого типа помещений устанавливается величина напряжений, не требующая специальных мер защиты – 220 В.

В ходе исследования применялось электрическое оборудование, такое как аналитические весы, центрифуги, шейкеры и термостаты. Электробезопасность в лаборатории обеспечивается принятием мер, предусмотренных ГОСТ IEC 61140-2012, ГОСТ 12.2.007.0-75 и ГОСТ Р 12.1.019-2009. К таким мерам относится конструкция электроприборов, средства защиты, проведение организационных и технических мероприятий. Для обеспечения электробезопасности в лабораториях НОЦ Н.М.Кижнера применяются защитное заземление, изоляция токоведущих частей, защитное отключение, выравнивание потенциалов, оградительные устройства и прочие электрозащитные средства согласно ГОСТ IEC 61140-2012.

5.3 Экологическая безопасность

Основной опасностью при работе с АФН плёнками является возможность контаминации окружающей среды. Во избежание таких нежелательных эффектов следует соблюдать рекомендации, приведенные в таблице 4.

Таблица 5.4 – Влияние объекта и процесса исследования на окружающую среду

	Влияние объекта и процесса исследования	Рекомендации по предотвращению воздействия
Атмосфера	Бактериальные клетки могут разноситься по воздуху, либо попадать в организм через дыхательные пути при очень близком контакте или непосредственном вдыхании.	Работа исключительно в ламинаре, при включенной вентиляции, с соблюдением необходимой дистанции и при наличии специальной одежды.
Гидросфера	Попадание обезвреживающих агентов, а также непосредственно бактериальной культуры в канализацию.	Правильная утилизация биологических отходов, их обезвреживание
Литосфера	Бактериальное заражение почв при неправильной утилизации отходов.	Сбор и утилизация отходов в соответствии с правилами

5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

5.4.1 Пожаровзрывоопасность

Согласно ст.27 п.5 Федерального закона от 22 июля 2008 г. N123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» лабораторные помещения отнесены к категории А, что означает повышенную пожаровзрывоопасность.

5.4.2 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследования и которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований

Исследуемая лаборатория относится к категории пожарной опасности Д-помещения относимые к негорючим и материалы в холодном состоянии.

По классу огнестойкости лаборатория относится к первому классу (СНиП 21-01-97^[23]) (лаборатория защищена трудно возгораемым материалом (кирпич)). Возможность возникновения пожара по причине возгорания электрического оборудования может произойти по причине как электрического характера, так и не электрического.

Причины возникновения пожара по электрическим причинам: Одним возможным фактором возникновения пожара может быть резкий скачок напряжения в линии электропередач. Данный скачок может быть виновником нагрева всех передающих сетей в лаборатории и отключению некоторого фильтрующего вакуум оборудования (насосы) что может привести к пожароопасной ситуации из-за возрастания концентрации масла в камере. Возможен нагрев, оплавление и даже возгорание коммутационного и защитного оборудования (автоматы, предохранители). В ходе возникновения сбоев в работе электропитания и пожара, может произойти утечка азота из баллонов, что приведет к взрывоопасной ситуации.

Все рассмотренные выше ситуации могут произойти по вине работающего персонала, его не компетенции и не подготовленности к чрезвычайным ситуациям (не своевременная замена устаревших комплектующих газового оборудования (шланги, манометры и т.д.)).

В исследуемой лаборатории для ликвидации возгорания используются переносные средства пожаротушения (огнетушители, набор для резки электрических кабелей, топор, пожарный крюк), которые применяются для тушения возгорания до приезда пожарного расчета.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью данной ВКР являлось исследование фотоэлектрических свойств АФН-пленок на основе CdTe, CdTe:Ag, разработка автономного ПОИ и создание оптоэлектронного преобразователя для контроля оптических параметров жидких сред. В рамках литературного обзора был проведён анализ методик для проведения исследований полупроводниковых источников и приемников излучения, в том числе тонкоплёночных АФН-структур и оптоэлектронных систем, в видимой и ближней инфракрасной области спектра с применением эффекта НПВО. Проведенный литературный обзор и анализ текущих исследований в области оптрона открытого канала и АФН-эффекта

В третьем разделе настоящей работы рассмотрены особенности характеристик АФН-пленок с позиций спектрального согласования со светоизлучателями, быстродействия и величины генерируемого фотонапряжения приводит к заключению, что наиболее подходящими являются пленки. , CdTe:Ag, CdSe и трехселенистой сурьмы. .Расширение сфер и объёма применения АФН-приемников для автоматизации производственных процессов связано с развитием технологии получения АФН-плёнок, совершенствованием их применения в качестве ПОИ, а также развитием метрологии и схемотехники.

Проведена, основанная на экспериментальных данных, систематизация особенностей ПОИ, АФН-пленочных структур, первичных элементов оптоэлектроники. Показано, что такая систематизация позволяет выбрать более адекватное строение оптрона открытого канала. Экспериментально подтверждено, что ПОИ на основе АФН-пленок имеет ряд преимуществ: исключение внешнего источника питания для ПОИ, снижение веса и габаритов, обеспечение полной электрической развязки между цепями «излучатель – ПОИ». Разработан ряд методик и подходов для получения эффективных АФН-плёнок и для изучения их особенностей.

Предложен метод многофункциональной оптоэлектронной системы неразрушающего контроля технологических параметров нефти и

нефтепродуктов. Для этого рассчитано светопропускание (k) элементов НПВО, линзовых элементов. Показано, что для вычисления k нужно задать конкретный тип элемента НПВО. Предложены и детально обоснованы следующие основополагающие направления:

а) совершенствование преобразователей оптической информации на основе элемента НПВО и оптрона открытого канала;

б) развитие технологии обработки фотоэлектрического сигнала - схемотехника, методы испытаний и параметрической стабилизации характеристик;

в) расширение применения микропроцессоров и современных ЭВМ.

Доказано, что применение оптоэлектронных многофункциональных систем не только повышает информативность контроля, но и позволяет уменьшить погрешности от влияния внешних факторов, так как температура, влажность и уровень вибрации могут учитываться при автоматической коррекции погрешности.

Разработаны методики определения технологических параметров, таких как: влажность хлопка-сырца и его продуктов; концентрация глицерина; форма, объём и дефектность коконов; толщина листового стекла; шероховатость, дефектность, зернистость и цвет металлических поверхностей.

Для реализации комплекса предложенных методик по выбору оптрона открытого канала на основе излучателя и АФН-приемника предложена волоконно-оптическая система, обладающая достаточно простой конструкцией, дающей возможность приема световой энергии через оптоволокно, что открывает принципиально новую возможность миниатюризации оптоэлектронных волоконно-оптических систем.

Проведенный анализ научно-технического уровня исследования, в рамках раздела «финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение», показал, что исследование имеет высокую значимость для прикладных и научно-исследовательских областей импульсной техники, однако не используется в широком спектре отраслей.

В рамках раздела «социальная ответственность» определены опасные и вредные факторы, имеющие место в работе с экспериментальным стендом. Разработаны профилактические меры по предотвращению чрезвычайных ситуаций при работе с экспериментальным стендом, а также необходимые меры безопасности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Рывкин.С.М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. М. “Физматтиз”, 1963, - 494 с.
2. Бьюб Р. Фотопроводимость твердых тел. М., “ИЛ”, 1962, -558 с.
3. Адирович Э.И. -В кн. Фотоэлектрические явления в полупроводниках и оптоэлектроника - Ташкент: ФАН, 1972, с.143-229
4. Class A.M., Von der Linde D., Nergan T.J. High-voltage Bulk Photovoltale effekt and the Photorefractive process in LiNbO_3 . Appl. Phy. Lett/ 1974, N4, v. 25, p. 233-236; Invesigation of the Eiektrical Propertion of $\text{Sr}_{1-x}\text{Ba}_x\text{Nb}_2\text{O}_6$ with Special Reference to pyrroelectrics Direction. - J.of Appl Phys., 1969. v. 40, N12, p. 4699-4713.
5. Fridkln V.M., Perov B.N., Verkhovskaya K.A. Effekt of Anomalous Bulk Photovoltage in Perroelektrics. Phys. Stat. Sol. Ser. A, 1977, v. 39, N1, p. 193-201.
6. Мастов Э.М. Исследование аномального большого фотомагнитного эффекта в пленок теллурида кадмия. -Дис..... канд.физ. -мат.наук, -Ташкент, 1972, -125 с.
7. Юабов Ю.М. Полупроводниковые пленки с аномально большим фотонапряжением. Дис..... канд. физ. мат. наук, -Ташкент, 1965, - 90с.
8. Мирзамахмудов Т. Исследование АФН эффекта в полупроводниковых пленках с узкой запрещенной зоной. Дис.... канд.физ. -мат.наук, Ташкент, 1971, -125 с.
9. Шакиров Н. Кинетика и характеристические времена АФН эффекта в полупроводниковых пленках с микро -Р-п-переходами. -Дис..... канд.физ. - мат.наук, -Ташкент, 1970, 180 с.
10. Наиманбаев Р. Исследование фотоэлектрических свойств АФН-пленок теллурида кадмия и трехселенистой сурьмы и разработка на их основе

оптоэлектронных приборов. Дис..... канд. физ. - мат.наук, -Ташкент, 1977, -126 с.

11. Рахимов Н.Р., АФН – приемник для неразрушающего контроля параметров веществ и материалов. Сб. статей в кн. «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики», Киев – 2000, с. 59 – 63.

12. Рахимов Н.Р., Тожиев Р.Ж., Сайдахмедов Ш.М., Хайдаров И.М. Датчик – зонд для контроля за влажностью и содержанием воды в нефти и нефтепродуктах. Узбекский журнал нефти и газа. 2, 2001г., с. 39-40.

13. Рахимов Н.Р., Тожиев Р.Ж., Сайдахмедов Ш.М., Хатамов С.О. Разработка приборов для экспрессного контроля за последовательной перекачкой нефти. Узбекский журнал нефти и газа. 3, 2001г., с. 41-42.

14. Рахимов Н.Р., Касымохунова А.М., Усмонов Ш. Оптоэлектронные средства неразрушающего контроля физико-химических параметров жидких сред. Международный журнал, Техническая диагностика и неразрушающий контроль №3, 2001г., с.40-42.

15. Рахимов Н.Р., Юлдашев А.А. “Отличительные особенности АФН - приемников и оптоэлектронные приборы на их основе”. в кн. Проблемы производства поли - и монокристаллического кремния для микроэлектроники и солнечной энергетики. Андижан 2000 г. с. 153-154.

16. Rahimov N.R., Dzhurakhalov A.A.. Investigation of APV-CdTe-films and development of optoelectronic devices on their basis / The European material research conference EMRS 2002 Spring meeting. – Strasbourg–France, 2002. – P. 242.

17. Mirzamakhmudov T.M., Rahimov N.R., Gafurov U.A. Coordinate and Sensitive self-contained optical radiation detector КЧП-1М / Moscow: Vneshtorgizdat. № 3823T,1991. 2 p.

18. Рахимов Н.Р, Серьёзов А.Н. Координатно-чувствительный автономный
19. приемник оптического излучения / Патент РФ №2246779, БИ. 2005. №5.
20. Рахимов Н.Р, Серьёзов А.Н. Координатно-чувствительный приемник оптического излучения на основе пленок с аномальным фотонапряжением / ПТЭ, 2005. № 4. – С. 125-126.
21. Заявка № 19714820 Германия, МПК6 01 J 1/22, В 64 G 1/36. Optischer positions-auflösender Sensor. Оpub. 15.10.98.
22. Рахимов Н.Р., Серьёзов А.Н., Петров П.М.. Двумерный координатно-чувствительный приемник оптического излучения / Патент РФ №2246779, БИ. 2007. №3.
23. Рахимов Н.Р., Ушаков О.К.,Оптоэлектронные датчики на основе.. АФН-эффекта / монография. – Новосибирск: СП «Наука РАН, 2010. – 218 с.
24. Н Р. Рахимов, Д.Д. Алижанов «Приемники оптического излучения на основе полупроводниковых пленок с аномальным высоким фотонапряжением» ГЕО – Сибирь - 2010: сб. материалов VI Междунар. науч. конгр. «ГЕО – Сибирь - 2010», 19 - 29 апреля 2010 г., Новосибирск.- Новосибирск: СГГА, 2010. - Т.5.,ч.1. – С.53-55
25. Н.Р. Рахимов, С. М. Отажонов, Д.Д Алижанов «Автономный приемник оптического излучения на основе АФН структур» ФерГУ, Фергана, 2011 г. С.214-217.
26. Особенности получения фоточувствительных пленок с аномальным фотонапряжением/ Д.Д. Алижанов.// Автоматика и программная инженерия. 2013.№ 3 (5).
27. Перспективы применения АФН – приемника для разработки оптоэлектронной информационно – измерительной системы./ Н.Р. Рахимов, Д.Д Алижанов, В.А. Жмудь. //Научный вестник НГТУ – 2014г.

28. Автономный приемник рентгеновского и ультрафиолетового излучения / Д.Д. Алижанов, Н.Р. Рахимов, В.А. Жмудь// ПТЭ 2015. - № 1, с. 131-132
29. Координатно-чувствительные приемники оптического излучения на основе полупроводниковых пленок с аномальным фотонапряжением / Н.Р. Рахимов, А.Н. Серьезнов, Б.Н. Рахимов, Д.Д. Алижанов // XIII Международная научно-техническая конференция АПЭП – 2016 г.
30. Преимущества использования АФН-элементов в автоматизации./ Алижанов Д.Д. Мирзаев К.С. Усмонов Ж.Н. Анарбоев И. Сохибова З.М. // Автоматика и программная инженерия. 2017. № 2 (20). С. 114–118.

**Investigation of the photoelectric properties of AFS films for the development of
an autonomous receiver of optical radiation**

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ71	Одилжонов Обиджон Одилжонович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Рахимов Нейматжон Рахимович	доктор технических наук, профессор		

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Аксёнова Наталия Валерьевна	К. филол.н.		

INTRODUCTION

Currently, the study of the photovoltaic properties of semiconductor films is receiving growing attention from specialists. Films that exhibit anomalous photovoltaic effects (APE) are of great theoretical and practical interest when developing sensing devices, namely, semiconductor photoelectric detectors.

Existing semiconductor photoelectric detectors and devices based thereon require the mandatory application of power sources. The output voltage generated by the p-n junction in a valve mode is deliberately limited by semiconductor band gap. One of the prospective optical methods is optoelectronic control based on an emitter and APE-receiver, which makes it possible to eliminate the need for an external power supply for semiconductor photoelectric detectors, as well as reduce weight and size, and provide a complete electrical isolation between light-emitting diode of the semiconductor detector circuits.

The aim of this work is to study the photovoltaic properties of APE-films based on CdTe, CdTe:Ag, develop an autonomous semiconductor detector, and create an optoelectronic converter in order to control optical parameters of fluid media. In this connection, the following tasks are solved:

- Analysis of existing methods of obtaining APE-films and mechanisms of the occurrence of APE-effect in film semiconductor compounds, namely CdTe, CdTe:Ag;
- Choice of the optimal technological production mode of effective APE-films based on CdTe, CdTe:Ag compounds and the clarification of the mechanism of APE-effect occurrence;
- Study of photovoltaic properties of CdTe:Ag APE-films;
- Development of methods to increase the value of APE in film structures;
- Development of an autonomous semiconductor photoelectric detector on the basis of APE-films;
- Creation of optoelectronic devices to control optical parameters of liquids on the basis of an APE-receiver.

The practical value of the work lies in the fact that the methods of the

production of APE-receivers developed in this master thesis provide new opportunities for optoelectronic instrumentation development. The classification of including APE-receivers in optoelectronic control devices options has been suggested. An analytic form of the distribution of light-emitting diode radiation after interaction with the controlled object, which allows determining the optimal area of the light-sensitive surface of an APE-receiver, has been obtained.

1 LITERATURE REVIEW

1.1 Photovoltaic effect in semiconductors

It is known that photo-emf (or photon voltage) in semiconductors, regardless of its nature, cannot exceed band gap, i.e. several volts [1]. For example, in a homogeneous semiconductor, the Dember (diffusion) photon voltage for an arbitrarily large intensity of the exciting light does not exceed the value:

$$V = \frac{kT}{q} \ln \frac{n_1}{n_0} \ll \frac{kT}{q} \ln \frac{N_c}{n_0} = E_q, \quad (1.1)$$

where E_q is the width of the band is gap, n_1 and n_0 are non-equilibrium and equilibrium density of carriers, and N_c is the density of states.

Another example is the photon voltage caused by the illumination of the p-n junction [2].

$$V \leq \frac{kT}{q} \ln \frac{n_n p_p}{n_0^2} = E_{Fn} - E_{Fp}, \quad (1.2)$$

which also does not exceed E_q . Here, n_n and p_p are the concentration of electrons in the n-region and holes in the p-region, respectively, while E_{Fn} and E_{Fp} are Fermi level energy in the n- and p- regions.

Until recently, the only exception to this rule has been semiconductor textures in which the anomalous photovoltaic effect (APE-effect) resulting from the addition of the elementary Dember emf (1.1) or elementary photo-emf (1.2) developing on a separate texture p-n junctions [3]. In such textures made from sputtered layers of CdTe, Si, Ge, GaAs, PbS, etc., the photon voltage can reach values of several hundred volts per centimeter of length in the direction of adding basic photo-emf.

Firstly, the anomalous photovoltaic effect has been observed in a number of homogeneous single ferroelectric crystals [4–12]. It has proven to be that under the conditions of uniform homogeneous illumination of a ferroelectric with open

electrodes in an intrinsic or extrinsic spectral region, there is the voltage of approximately 10^3 – 10^8 exceeding, thus, E_q value by two to four orders of magnitude.

To date, several dozens of experimental works on the APE-effect have been published. First of all, it should be noted that the existence of the APE-effect can now be considered firmly-established for many types of semiconductor crystals.

1.2 APE-effect in semiconductor films

In 1946, Starkiewicz, Sosnowski, and Simpson [13] observed photon voltages E_q equal to 1.2 V in lead sulfide, which E_g is equal to 0.4 V, and the authors have not only noted this fact as a physical anomaly but also expressed some ideas for its explanation.

Firstly, Berlaga R. Ya. et al. [14], Schwabe [15], Pivkovskij [16], et al. were engaged in the study of the detected APE-effect. There are many works on obtaining and studying the APE-effect, but in the current work, we limit ourselves to a reference to the bibliography given in [17–21].

Interest in the physical and applied aspects of the APE-effect significantly increased after Pensak and Goldstein [22] have shown that the photon voltage in CdTe films at room temperature can reach hundreds of volts. They found that the value of APE depends on the layer thickness and the substrate temperature during the process of film sputtering, and for the greater mobility during the process of the formation of the APE-effect in cadmium telluride films, the substrate temperature is important. Pensak and Goldstein showed that the optimal temperature of the substrate temperature is in the range of 150–200°C, while at the temperature of the substrate equal to 250°C, there was no APE-effect.

As a result of the analysis of the sputter technological process, a number of researchers have shown that in order to obtain high-efficiency films, it is necessary to combine the optimal values of pressure and composition of residual gases in the vacuum chamber, the temperatures of the substrate and the film evaporator, and the sputtering angle.

Lyubin V. M. and Fjodorov G. A. [23] have obtained more efficient APE-films made from cadmium telluride at 300⁰C. In [24,25], CdTe APE-film has been obtained in two ways. In the first case, the required material was evaporated from a single crucible. The films of the second group were obtained by simultaneous evaporation from two crucibles CdTe and Cd. The substrate temperature was 270⁰C. Research under similar technological and practical aspects has been carried out by authors of works [18,26]. It is shown that there is no anomalous photon voltage at a temperature below 100⁰C.

Currently, the photovoltaic properties of the APE-film have been extensively studied. In works [17,18,22], the volt-ampere characteristics (VAC) have been measured in a wide range of light illumination. In Fig. 1.1, standard dark and light volt-ampere characteristics of CdTe APE-films obtained at room temperature are presented [18]. Volt-ampere characteristics of all studied APE-films in the range of illumination values 0...3,5·10⁴ lux, and intensities of the electric field are 0...10³ V/cm follow the Ohm's law.

Theoretical consideration of volt-ampere characteristics of the battery consisting of a large number of p-n-transitions was firstly conducted by V. I. Stafeev [27].

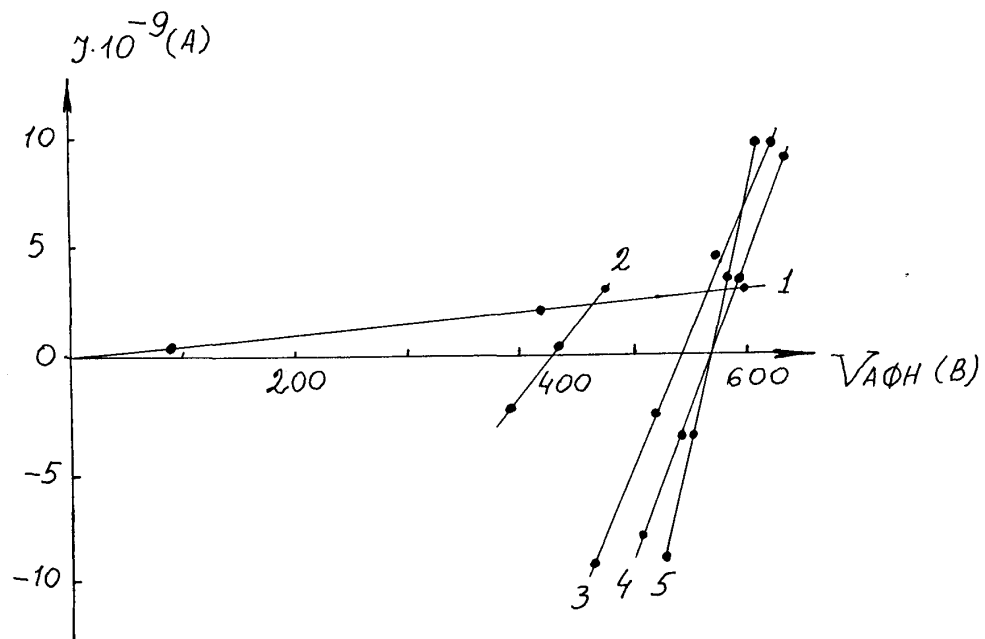


Figure 1.1-The volt-ampere characteristic of APE-films of cadmium telluride (CdTe) in different light conditions.

1 – $V = 0$; 2 – $V = 1.75 \cdot 10^4$ lux; 3 – $V = 7.7 \cdot 10^4$ lux;
4 – $V = 1.36 \cdot 10^4$ lux; 5 – $V = 2.5 \cdot 10^4$ lux.

Work [21] shows that the dark VAC for the films are linear to the value of $E = 5 \cdot 10^3$ V/cm and superlinear within the interval $5 \cdot 10^3 \dots 5 \cdot 10^4$ V/cm. No sublinear section was detected on any film up to the breakdown values of $E \geq 10^5$ V/cm. When the samples are illuminated, their VAC align and starting from some values of light intensity become linear.

Studies based on spectral dependences have shown that the photon voltages are caused by the light from the characteristic absorption area (Fig.1.2).

Taking into account the fact that APE-films have been obtained by anisotropic sputtering, it would be reasonable to expect the occurrence of this anisotropy when films are illuminated by polarized light [3].

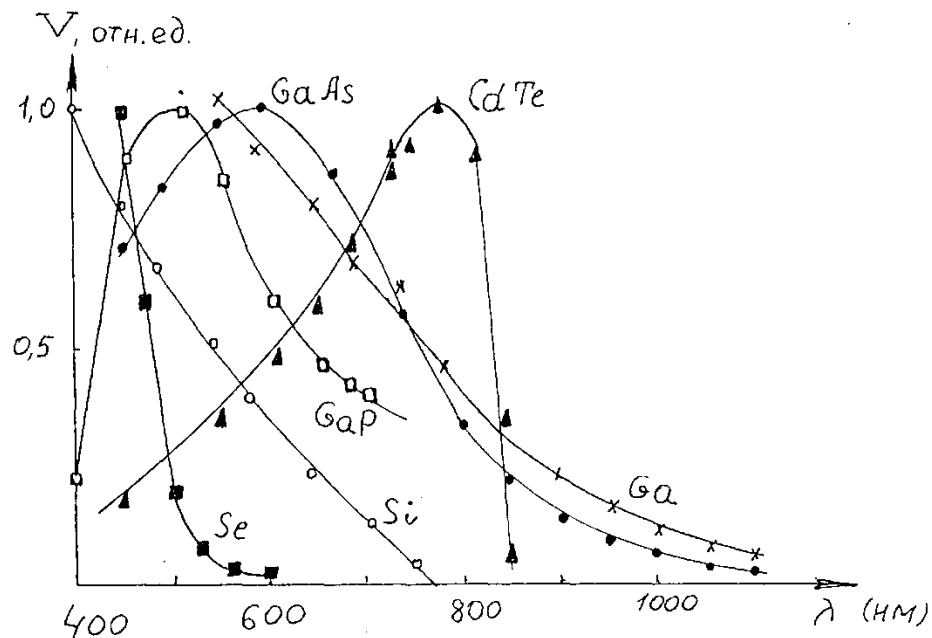


Figure 1.2- Typical spectra of the APE-film photovoltage.

It seemed to be possible to clarify the influence of the polarized light on the value of V_{APE} . Experiments performed in the polarized light have shown that the photon voltage of APE-films of silicon and gallium arsenide strongly depends on the attitude of the orientation of the light polarization plane to the straight line connecting the film electrodes.

Typical polar diagrams of V_{APE} dependence on the angle β are given in Fig.1.3. For the Si and GaAs films, the maximum value of V_{APE} is found either when $\beta=0$, or when $\beta=90^\circ$. For example, for the Si film shown in Fig.1.3 and the GaAs film, the maximum value complies with $\beta=90^\circ$.

For the Si and GaAs films, V_{APE} variations in the magnitude from β_{max} to β_{min} are 50% and 30%, respectively. The difference between the maximum and minimum values of the photon voltage declines with a decrease in the film thickness. These data indicate that the film anisotropy accumulates with an increase in thickness. Apparently, to some extent, it is connected with the lack of the impact of the angle on the value of V_{APE} in Ge APE-films and chalcogenide compounds.

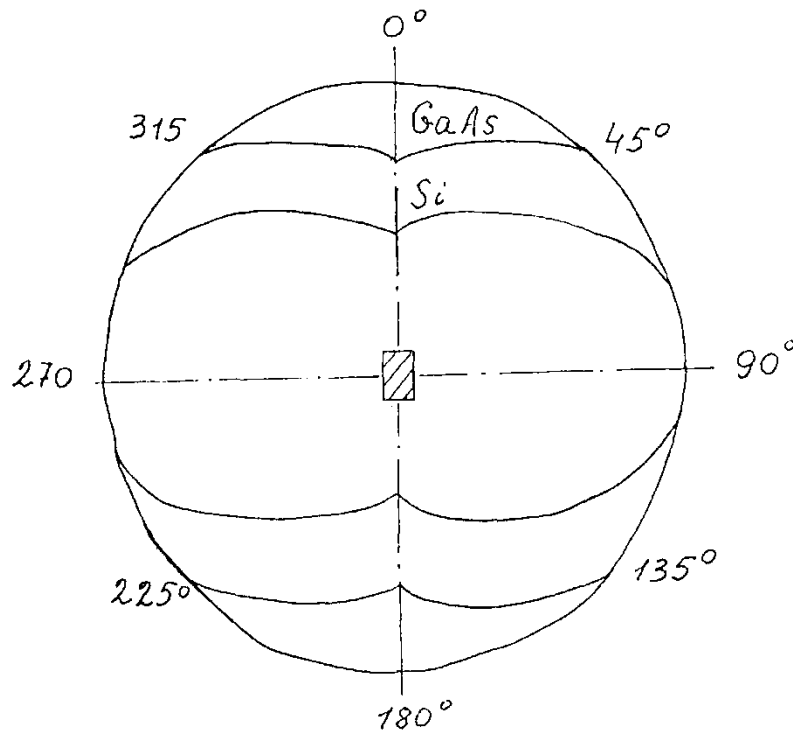


Figure 1.3- Dependence of the photon voltage on the angle between the plane of the electric vector of the exciting light and the straight line connecting the electrodes of the film.

The influence of the orientation of the light polarization plane on the V_{APE} value of the films, as well as CdTe and Se, is large; it accounts for 5–10% for CdTe and 10–20% for Se [3].

In order to obtain information on the magnitude of photon voltage, short-circuit current, and resistance of films in the entire range of intermediate temperatures, temperature studies have been carried out in [18,22]. In these works, it is noted that photon voltage and resistance increase within temperature decrease.

Figure 1.4 shows experimental results [21] for the CdTe films [3], and APE-film parameters temperature dependence taken from [22]. As shown in Fig. 1.4, the short-circuit current in CdTe films does not depend on temperature. The temperature behavior of the generated photovoltage is identical to temperature dependence of the film resistance. The method of production of CdTe APE-film by thermal evaporation is given in work [3].

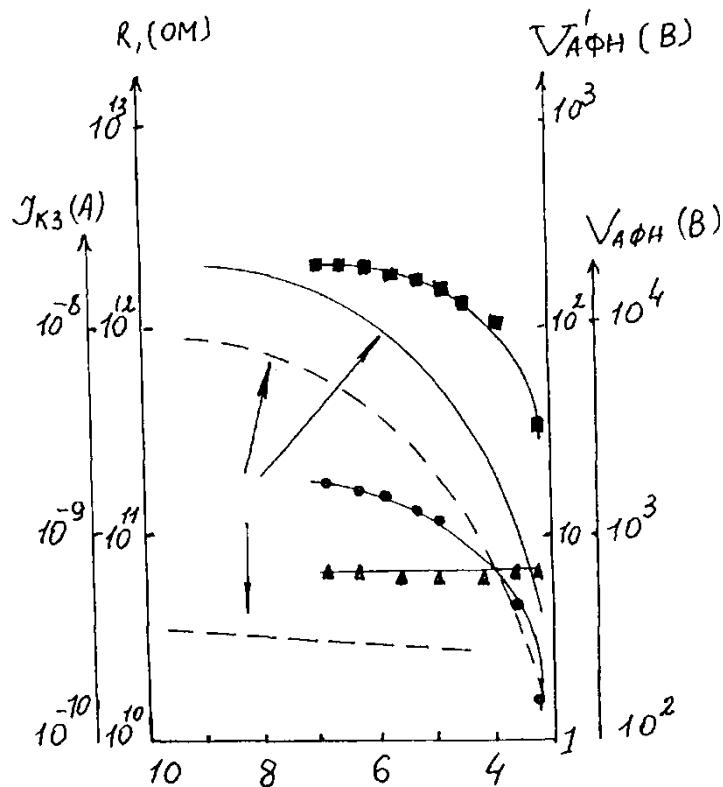


Figure 1.4- Temperature dependence of CdTe APE-films [3].

The evaporation of cadmium telluride powdered material (in some cases, crystalline CdTe has been used) has been performed in a crucible coated with aluminum oxide at

temperature of $\sim 750^{\circ}\text{C}$. The pressure of residual gases during the process of CdTe film sputtering was $10^{-4}\dots 10^{-5}$ mm of mercury and the sputtering angle was in the range of 45° . The substrates were glass, mica ferroelectric (NBE), quartz, LiF, NaCl, etc. The layer thickness was in the range of $\sim 1\text{ }\mu\text{m}$. Some parameters of the cadmium telluride APE-films are shown in Table.1.1. It should be noted that authors of [2] have managed to obtain photon voltages in cadmium telluride films at room temperature.

The occurrence of high voltage was noted during the deposition of the cadmium telluride within the temperature range of $250\text{--}400^{\circ}\text{C}$ and at angles of the molecular beam equal to $10\text{--}60^{\circ}\text{C}$. The upper limit was restricted to the re-evaporation of the material from the substrate.

To determine the behavior of films during heat treatment, we have investigated the temperature dependence of the generated V_{APE} photon voltage, the J_{SC} short-circuit current, and the R resistance of cadmium telluride films [2].

Several dozens of film samples with a thickness of $0.7\text{--}1.5\text{ MK}$ were produced. The original material is crystalline. The evaporation was carried out in a vacuum of 10^{-4} Torr on a glass substrate $(1.5\times 1)\text{ cm}^2$, the temperature of which was $100\text{--}300^{\circ}\text{C}$.

Table 1.1- The parameters of the APV of cadmium telluride films

Material	Temperature, T, $^{\circ}\text{C}$									
	room	50	100	150	200	225	250	300	350	400
	Volt									
Glass	20	50	140	220	260	300	180	120	50	25
Mica	10	70	220	240	280	340	160	140	70	40
Quartz	15	60	120	200	130	100	80	40	30	20
NBE ferroelectric	10	60	120	120	135	140	120	70	40	35

The films were processed in the air for $10\text{--}30$ minutes in a muffle furnace. The temperature of samples was measured using a copper constant thermocouple.

Firstly, the photon voltage of the film was increasing (Fig. 1.5, curve 1) then was steadily falling. During heat treatment, the polarity of films remained unchanged, and the illumination was constant at all measurements ($I=25,000$ lux). The short-circuit current with the temperature increase up to 200°C was decreasing (Fig. 1.5, curve 3), while the film resistance was increasing at $50\text{--}100^{\circ}\text{C}$ (Fig. 1.5, curve 2).

In [3], it is shown that the dependence of J_{SC} , V_{APE} , and R for the CdTe films in the temperature range of $20\text{--}180^{\circ}\text{C}$ is complex; for example, the photon voltage of some samples was decreasing and the voltage of other samples was increasing.

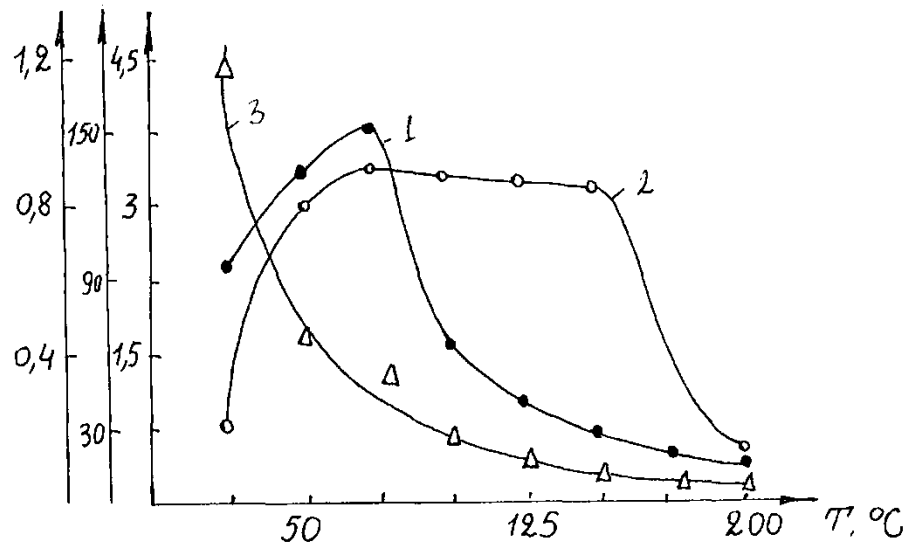


Figure 1.5- Dependence of V_{APE} (1), R (2), and J_{SC} (3) from T .

The variation of cadmium telluride APE-film parameters based on the temperature is due to their oxidation, which means that during the heat treatment, there occurred layers and saturation took place at a certain temperature. As a result, the resistance and photon voltage of samples was steadily decreasing. In addition, the structure and size of microcrystals could change [30,31].

1.4.1 Asymmetry of extrinsic centers

In [5,12], the model of the anomalous photovoltaic effect based on electronic transitions to the band gap from the extrinsic center with asymmetric potential distribution has been proposed. It leads to an asymmetric emission of an electron

from the extrinsic level into the band and a stationary photovoltaic current, respectively.

Following [12], let us consider the potential of the center in the form of an asymmetric rectangular barrier (Fig. 1.7). The electron between states ξ_0 and ξ (for $E < V_2$) results in a shift of the localized electron.

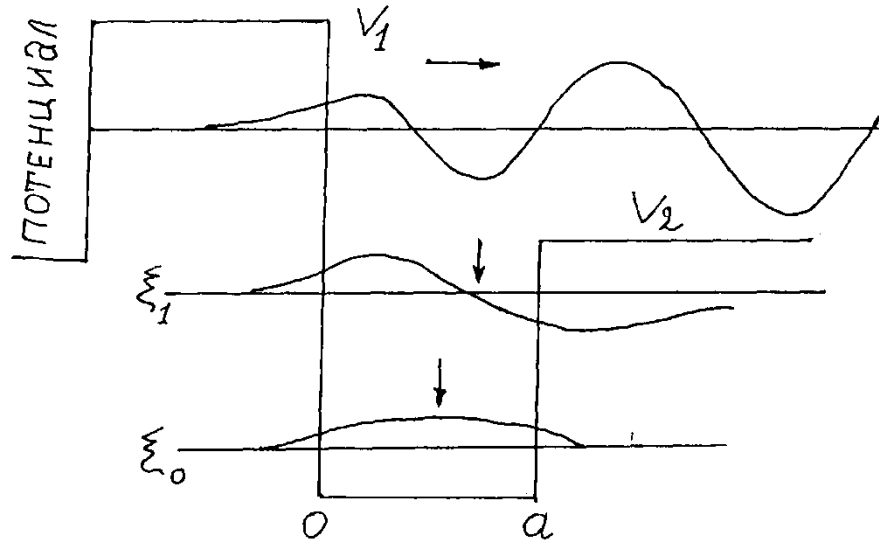


Figure 1.7- Asymmetric potential of the extrinsic center in ferroelectric and its related energy and wave functions [12]

This, in turn, can lead to a change in spontaneous polarization [7]. If the excited electron has energy $V_2 < E < V_1$, it behaves as a free electron with a wave vector $+\vec{k}$ (the direction of the wave vector is parallel to the spontaneous polarization). An electron with a wave vector $-\vec{k}$ only partially seeps through a potential barrier. Thus, the P_+ probability of the electron motion in the direction $+\vec{k}$ the more differs from the P_- probability of its motion in the direction $-\vec{k}$, the greater the spontaneous polarization.

Since the asymmetry of the potential of the extrinsic center is determined by directions of the spontaneous polarization and is the same for all its centers, then the density of the photovoltaic current J_1 associated with the asymmetric electron

emission for the intensity of the exciting light I with a frequency ω_0 associated with the asymmetric electron emission is equal to

$$J_1 = \frac{q\alpha^* I}{\hbar\omega_0} (P_+ l_+ - P_- l_-) \quad , \quad (1.6)$$

where l_+ , l_- are the free path of the electron in the direction $\pm k$ and α^* is the light absorption coefficient.

The current associated with the recombination of photoexcited carriers should be subtracted from the current (1.6). Indeed, after scattering the photoexcited carrier, its directed pulse \vec{k} is equal to 0 and it does not contribute to the photovoltaic current until recombination. Denoting the probability of the recombination in the direction $+\vec{k}$, $-\vec{k}$, respectively, through P_+^1 and P_-^1 we obtain the corresponding recombination current from (1.6) replacing P_+ and P_- by P_+^1 and P_-^1 as well as l_+ , l_- by l_+^1 and l_-^1 . Finally, the following expression for photovoltaic current was obtained in [11]:

$$J = J_1 - J_2 = K\alpha^* I \quad , \quad (1.7)$$

where Glass constant

$$K = \frac{q}{\hbar\omega_0} \cdot (l_+ P_+ - l_- P_- - l_+^1 P_+^1 - l_-^1 P_-^1) \quad (1.8)$$

depends only on nature of the extrinsic center, the free path of the electron, and the photon energy.

According to [12], the volt-ampere characteristics for $LiNbO_3$ corresponds to $K=2.5 \cdot 10^{-9}$ A. cm Wt⁻¹ and $\sigma_{\odot} + \sigma_{\ominus} = 1,3 \cdot 10^{-14} + 1,2 \cdot 10^{-12}$ Om⁻¹cm⁻¹. The photon voltage calculated for $LiNbO_3$ (1.6) complies with these values. According to the same data, the Glass constant K for $LiNbO_3:Fe$ does not depend on the

concentration of donor centers Fe^{2+} and Fe^{3+} as well as on the ratio between the Fe^{2+} and Fe^{3+} concentrations. At the same time, this ratio strongly affects the electrical conductivity and photoconductivity of a crystal, and, as expected, the APE effect [58].

When restoring $LiNbO_3:Fe$ in a nitrogen atmosphere and increasing the concentration of Fe^{2+} due to the concentration of Fe^{3+} , values σ_0 and σ_0 are rising, therefore, the values of V and $\overset{o}{A}$ are falling.

The mean electron shift $\langle l \rangle \approx 1 \overset{o}{A}$ corresponds to the experimental values of K in ferroelectric niobates [12,41].

It should be noted that in the conditions of such small shifts, the question of the applicability of the band model and the approximation of the effective mass remains open. Therefore, in the Glass model, the value $\langle l \rangle$ should rather be associated with the mean shift in the hopping (small radius polaron [99]). It is appropriate here to make the following observations. During the development of (1.7) and (1.8), it was assumed implicitly that the quantum yield of electrons is $\gamma=1$. Ruppel et al. [11] have measured electrons output in the conduction band from Fe^{2+} centers to $LiNbO_3$ and showed that $\gamma \approx 4 \cdot 10^{-3}$. According to (1.7), (1.8), this results in an average shift of $\langle l \rangle = 40 \overset{o}{A}$, which is significantly larger than the average hop length and therefore, contradicts the Glass model. In order to explain the nature of the photovoltaic current, the authors of [11,92] used the model of photoinduced fluctuations, which we will focus on.

CONCLUSION

The purpose of this thesis was to study photovoltaic properties of APE-films based on CdTe, CdTe:Ag, to develop autonomous semiconductor photoelectric detectors, and to create an optoelectronic converter in order to control optical parameters of fluid media. Within the framework of the literature review, the analysis of methods for conducting research of semiconductor sources and emission receivers, which included thin-film APE-structures and optoelectronic systems in the visible and near infra-red spectrum with the use of the frustrated TIR effect, was carried out. The literature review and the analysis of the current research in the field of an open channel opto-isolator and the APE-effect

The third section of this paper deals with characteristic features of APE-films from the point of spectral matching with light emitters, fast response, and the magnitude of the generated photon voltage, and it leads to the conclusion that the most suitable films are the films of CdTe:Ag, CdSe, and three-selenium antimony. The expansion of the fields and scope of application of APE-receivers for automation of production processes is related to the development of APE-film production technology, improvement of their use as semiconductor photoelectric detectors, as well as the development of metrology and circuit engineering.

Based on experimental data, the systematization of the features of semiconductor photoelectric detectors, APE-film structures, and primary elements of optoelectronics has been carried out. It is shown that such systematization allows choosing a more adequate structure of the open channel opto-isolator. It is experimentally confirmed that semiconductor photoelectric detectors based on APE-films have a number of advantages: elimination of external power supply for semiconductor photoelectric detectors, weight and size reduction, and provision of complete electrical isolation between the «emitter – semiconductor photoelectric

detector» circuits. A number of techniques and approaches have been developed to obtain efficient APE-films and to study their features.

The method of a multifunctional optoelectronic system of non-destructive control of technological parameters of oil and oil products is proposed. In order to perform this, the light transmission (k) of the frustrated TIR elements and lens elements is calculated. It is shown that in order to calculate k , it is necessary to specify a type of a frustrated TIR element. The following basic directions are proposed and justified in detail:

- a) improvement of optical information converters based on the frustrated TIR element and an open channel opto-isolator;
- b) development of photoelectric signal processing technology: circuit engineering, methods of testing, and parametric stabilization of characteristics;
- c) broader application of microprocessors and modern computers.

It is proved that the use of optoelectronic multifunctional systems not only increases control information value but also makes it possible to minimize errors due to the influence of such external factors, as temperature, humidity, and vibration level can be taken into account in the automatic error correction.

Such methods of technological parameters determination as the moisture of raw cotton and its products; glycerin concentration; shape, volume and defectiveness of pods; thickness of sheet glass; roughness, defectiveness, grit, and color of metal surfaces have been developed.

In order to implement the complex of the proposed methods for choosing an open channel opto-isolator based on the emitter and APE-receiver, a fiber-optic system, which has a fairly simple design that allows receiving light energy through the optical fiber, is proposed. Thus, it provides a fundamentally new opportunity for miniaturization of optoelectronic fiber-optic systems. The analysis of the scientific and technical level of the study within the section «Financial management, resource efficiency, and resource saving» has shown that the study is of high importance for the applied and research areas of pulse engineering, but it is not used in a wide range of industries.

Within the section «Social responsibility», dangerous and harmful factors occurring within the course of work with an experimental stand are revealed. Preventive measures on emergency prevention as well as the necessary safety measure when working with an experimental stand have been developed.